第 64 卷 第 3 期
2023 年 5 月

天 文 学 报
ACTA ASTRONOMICA SINICA

Vol. 64 No. 3
May, 2023

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.03.002

等离子天体物理学与现代等离子体宇宙观*

吴德金† 陈 玲‡

(中国科学院紫金山天文台行星科学重点实验室 南京 210023)

摘要 现代科学表明宇宙中99%以上的可观测物质都处于等离子体状态, 从小尺度的微观粒子动力学集体过程与能量转换机制到大尺度的宇宙等离子天体结构状态与爆发活动现象, 都是等离子天体物理学的研究课题. 从宇宙演化历史、大尺度结构形成以及爆发活动现象等方面, 系统地论述了等离子天体物理学在现代天文学发展以及现代等离子体宇宙观形成中的重要作用. 同时, 结合空间卫星科学探测研究及其对现代天文学的巨大影响, 进一步阐述了地球磁层和日球层等空间等离子体实地探测研究在等离子天体物理学研究中所扮演的"天然实验室"的独特作用.

关键词 大爆炸宇宙论, 宇宙大尺度结构, 高能天体物理学: 天体爆发活动, 等离子天体物理学, 宇宙论: 等离子体宇宙观

中图分类号: P172; **文献标识码**: A

1 引言: 为什么现代天文学发展需要等离子天体物理学

天文学是一门建立在观测基础上的古老学科. 现代科学意义上的天文学研究始于1609年伽利略的第1台天文望远镜指向天空, 不仅发现恒星数量远较以前肉眼所见多很多, 而且还发现了月球地貌、金星盈亏、木星卫星、土星光环等许多前所未知的天文现象, 从而开辟了现代天文学的新时代. 17–18世纪天文观测与牛顿力学的结合诞生了天体力学, 19–20世纪天体的光谱观测与原子物理学的结合进一步诞生了天体物理学. 天文学作为一门观测科学, 理论上可以由4个观测渠道获取天体的物理信息, 即来自天体的电磁辐射、宇宙线、中微子和引力波[1]. 不过, 由于中微子和引力波在信号探测方面存在巨大困难, 真正具有可用于研究价值的信息渠道, 实际上只有电磁辐射和宇宙线粒子. 虽然中微子和引力波都已经被直接探测到, 有关探测结果也都曾多次获得诺贝尔物理学奖(引力波于1993和2017年度; 中微子于1988、1995、2002、2015年度), 但是由于信息量极微, 而且基本上都是孤例, 难以提供可供持续研究的有效信息. 所以, 90%以上的天体物理信息依然来自对各种天体电磁辐射的观测, 而天体物理学的基本任务就是: 分析和解释天体的电磁辐射光谱, 并据此建立天体结构与演化的物理模型. 因此, 天体物理学的发展也是伴随着电磁辐射波天文观测技术的发展而推动发展的.

从低频射电波到高频伽马射线的电磁辐射谱涵盖了约20个数量级的波长范围. 但是, 截止上世纪40年代, 天文学观测能够有效利用的电磁波谱只有波长0.4–0.8 μm这仅有半个数量级范围内的可见

2022-10-03收到原稿, 2023-01-11收到修改稿
*国家自然科学基金项目(42174195、11873018、41531071)资助
†djwu@pmo.ac.cn
‡clvslc214@pmo.ac.cn

光窗口. 尽管如此, 在不到一个世纪的时间里, 基于光学天文观测的天体物理学还是取得了一系列巨大成就. 例如, 建立了以可见光辐射转移理论为核心的恒星大气模型、以热核聚变为核心的恒星结构与演化模型、以哈勃膨胀概念为核心的宇宙演化模型. 不过, 自第2次世界大战结束以来的半个多世纪里, 天文观测技术已经在两个方向上取得了重大突破, 一是借助于雷达技术开拓了更加宽广的射电波探测窗口[2]; 二是借助于空间卫星技术开拓了基于空间卫星平台的空间天文观测, 摆脱了地球大气吸收和湍动的影响, 又进一步开拓了X射线和伽马射线等高能观测窗口[3].

这两项天文观测技术上的重大突破, 不仅催生了射电天文学、X射线天文学等新型天文学分支, 更是给我们展示了一幅前所未见的宇宙物质分布与结构图景, 极大地拓展了天体物理学研究的新视野. 同时, 也使整个天体物理学的研究方向发生了重大转变, 从对具有稳定运动轨道和形状的稳恒天体及其天体系统(如恒星、星系、星系团等)的稳态平衡结构及其长期演化的研究, 转向了对弥散的宇宙等离子天体(如星际介质、星系际介质、星系团热气体等)和非稳态天体爆发活动现象(如太阳耀斑、超新星爆发、河外射电喷流、宇宙伽马暴和快速射电暴等)及其瞬变动力学过程的研究. 前者主要是由引力相互作用主导, 而在后者中, 等离子天体与磁场间的电磁相互作用起着重要作用. 正是由于全波段天文观测、特别是射电和X射线天文学的发展与等离子体物理学的结合, 导致了一个新兴交叉学科–**等离子天体物理学(Plasma Astrophysics)**的诞生.

与此同时, 随着人类空间时代的到来, 空间卫星的实地探测也揭示了越来越多宇宙天然等离子体丰富的多尺度结构现象及其动力学演化过程. 例如, 复杂的地球磁层及其全球电流耦合系统、日球层大尺度磁等离子体结构以及不同环境下的各种磁中性电流片、载流磁通量管、非线性孤波结构、无碰撞激波、磁场重联、粒子加速和普遍的等离子体波湍动等丰富的磁等离子体活动现象. 我们通过天文观测能够直接看到的是那些来自遥远天体的电磁辐射波, 它们只是发生在遥远天体中的一系列复杂磁等离子天体动力学过程的附带产品: 加速带电粒子产生的电磁波辐射. 然而, 许多宇宙天然等离子体并不直接产生可观测的电磁辐射, 因而也无法通过天体辐射电磁波这一传统的天文观测手段深入了解它们的结构状态和动力学过程. 而空间卫星的实地探测结果, 无疑为我们提供了深入了解宇宙天然等离子体动力学过程的实践机会, 也为等离子天体物理学的进一步深入研究提供了一个“天然实验室”.

现代科学表明, 宇宙中99%以上的可观测物质处于等离子体状态, 长程电磁力不仅在粒子微观动力学过程中起主导作用, 而且在宇宙大尺度天体结构的形成及其宏观动力学演化中也是十分重要的关键因素. 从宇宙演化历史(§2)、宇宙等离子天体大尺度结构状态(§3)、宇宙天体爆发活动现象及其能量转换机制(§4)等几个方面, 本文系统地阐明了等离子天体物理学在现代天文学发展以及等离子体宇宙观形成中的重要作用. 同时, 结合空间卫星探测的丰富成果, 进一步阐述空间等离子体实地探测研究在等离子天体物理学研究中所扮演的天然实验室的独特作用(§5). 最后, 对等离子天体物理学的学科发展方向及其未来趋势进行简单总结和展望(§6).

2 宇宙膨胀演化史: 从原初等离子体火球到再电离等离子天体宇宙

大爆炸宇宙模型虽然存在许多待解之谜, 但是由于受到宇宙膨胀、宇宙微波背景辐射以及宇宙元素丰度这3大观测现象的有力支持, 已经成为最广泛接受的标准宇宙学模型. 根据大爆炸宇宙模型, 现在观测到的宇宙始于100多亿年前的一次奇点大爆炸. 在爆炸之初的普朗克时间$t_{\rm p} \sim 5.38 \times 10^{-44}$ s之前, 宇宙的状态是在现代物理理论描述范畴之外的奇点. 所谓普朗克时间, 是指在最小黑洞范围内建立物理因果联系所需要的最短时间. 基于现代量子理论的测不准原理, 能够实验测定的最小黑洞半径约为$r_{\rm s} \sim 2l_{\rm p} \sim 3.23 \times 10^{-35}$ m ($l_{\rm p} \sim 1.61 \times 10^{-35}$ m为普朗克尺度), 相应的最小黑洞质量即普朗克质量为$M_{\rm p} \sim 2.18 \times$

10^{-8} kg. 黑洞是宇宙最致密的天体, 其平均密度随半径的增大而减小. 因此能够实验测定的最高密度, 普朗克密度即为上述最小黑洞的密度: $\rho_{\rm p} \sim 3M_{\rm p}/(4\pi r_{\rm s}^3) \sim 1.55 \times 10^{95}$ kg/m^3, 相应的能量密度: $\epsilon_{\rm p} \sim \rho_{\rm p}c^2 \sim 1.39 \times 10^{112}$ J/m^3, 或者辐射热平衡温度: $T_{\rm p} \sim 10^{32}$ K $\sim 10^{19}$ GeV[1].

依据现有可观测宇宙范围内总质量约为$M_0 \sim 10^{52}$ kg的估计, 假设宇宙膨胀过程中保持物质总量守恒, 则普朗克时刻的宇宙尺度应为$R_{\rm p} \sim 2.49 \times 10^{-15}$ m, 要建立起物理上的因果联系, 需要经历$\sim 10^{-23}$ s的"漫长"时间. 为了克服这个因果性困难, Guth在80年代初提出宇宙暴胀模型[4], 认为宇宙从普朗克时间起的致密"能量包", 在经历过一段"缓慢"膨胀到$t \sim 10^{-35}$ s时, 宇宙密度降低到$\sim 10^{79}$ kg/m^3、温度降低到$T \sim 10^{28}$ K $\sim 10^{15}$ GeV, 具有负压强的真空Higgs场开始主导宇宙经历了一个暴胀演化相, 使宇宙尺度在$t \sim 10^{-34}$ s的时间内暴胀了$\sim 10^{26}$倍. 在此期间, 宇宙密度和温度并没有如"预期"的降低$\sim 10^{78}$倍和$\sim 10^{19.5}$倍, 而是因为真空Higgs场的不断补充和再加热而维持在几乎不变的水平. 因此, 在暴胀相结束时, 可观测宇宙中的绝大部分物质并不是来自普朗克时代的原初"能量包", 而是来自宇宙暴胀相期间真空Higgs场的不断补充. 此后, 宇宙演化进入粒子相互作用的所谓"大统一理论(GUT)"时期, 其中强、弱和电磁相互作用具有相同的量级. 不过, 这期间的粒子产生过程仍然无法得到实验验证, 因为无论是目前实验室中的高能粒子加速器, 还是高能宇宙线粒子观测, 其能量都在10^{14} GeV以下[1]. 这里, 我们对宇宙暴胀之后各演化时期宇宙能量物质的物理状态做简要描述, 它们也是现在可观测宇宙物质在宇宙演化过程中所经历过的主要物态.

2.1 夸克-胶子等离子体时期(quark-gluon plasma: $t \sim 10^{-34}$–10^{-5} s, $T \sim 10^{28}$–10^{12} K)

在暴胀相结束之后, 宇宙开始进入绝热膨胀模式, 并一直持续到现在. 按照现代量子场论的大统一理论, 在宇宙绝热膨胀早期, 宇宙物质主要包含6种带有分数电荷的夸克(即带有+(2/3)e电荷的顶、粲、上夸克和带有−(1/3)e电荷的底、奇、下夸克)和相应带有反号等量电荷的反物质夸克粒子组成. 由于具有极高的温度, 这些夸克能够以自由运动粒子的形式存在, 并通过交换胶子发生强相互作用. 同时, 通过正反粒子对的湮灭和产生与辐射场达到热平衡状态. 因此, 这时的早期宇宙实际上是处于极端高温下的等离子体状态, 称为**"夸克-胶子等离子体(quark-gluon plasma)"**. 另外, 在夸克-胶子等离子体中, 还混合有少量的轻子和相应的反轻子. 轻子有6种, 即陶子、缪子、电子及其相应的中微子, 其中陶子、缪子都和电子一样带有−e的电荷, 但3 种中微子都是不带电的. 这些夸克和轻子是现代粒子物理理论框架下构造出宇宙现存所有物质的最基本粒子, 而早期热宇宙演化阶段就是由这些基本粒子及其反粒子组成的、具有极端高温的**夸克-胶子等离子体时期**.

大约在$t \sim 10^{-10}$ s时, 宇宙温度降至$T \sim 2 \times 10^{15}$ K $\sim$ 175 GeV, 最重的顶夸克(质量约172 GeV)开始湮灭为辐射能, 并转化成较轻的夸克. 当温度降至$T \sim 2 \times 10^{13}$ K时, 最重的轻子(即质量约1.78 GeV的陶子)也开始湮灭成辐射能. 当宇宙演化到$t \sim 10^{-5}$ s时, 温度进一步降至$T \sim 3 \times 10^{12}$ K $\sim$ 250 MeV, 此时质量为$\sim$ 4.19 GeV和1.27 GeV的底夸克和粲夸克也因相继湮灭而消失在宇宙中. 同时, 相应的宇宙物质密度也降至$\rho \sim 3 \times 10^{17}$ kg/m^3, 与现在的重子(质子、中子)的质量密度$\rho_{\rm b} \sim 4 \times 10^{17}$ kg/m^{3}具有相同量级. 净余色荷为零的重子由3个夸克通过强相互作用耦合组成, 其中质子由"上上下" 3个夸克组成, 带有+e的电荷, 中子由"下下上" 3个夸克组成, 总电荷为0. 强相互作用的特征尺度、亦即重子的特征半径$r_{\rm b} \sim 10^{-15}$ m, 相应的重子束缚势能约300 MeV. 随着宇宙膨胀的继续进行, 宇宙温度降至夸克结合形成重子的束缚能, 达到夸克-胶子等离子体的冻结温度, 并发生从夸克-胶子等离子体到重子-轻子等离子体的宇宙相变. 此时, 夸克-胶子等离子体湮灭后残存下来的上、下夸克将不再处于自由热运动状态, 而是通过强相互作用耦合被"禁闭"在$r_{\rm b} \sim 10^{-15}$ m的重子尺度范围内形成稳定的质子和中子. 自此, 宇宙物质状态也从夸克-胶子等离子体时代, 演化进入

了“重子-轻子等离子体时期”[5].

2.2 重子-轻子等离子体时期(baryon-lepton plasma: $t \sim 10^{-5}$–10^{2} s, $T \sim 10^{12}$–10^{9} K)

在宇宙演化从夸克-胶子等离子体进入重子-轻子等离子体的时期, 宇宙物质的主要成份是带有整数电荷的重子、轻子和相应的反粒子, 物质间起主导作用的相互作用力是电磁力. 不过, 在这个由物质-反物质占主导成分的宇宙时期, 有一个让人困扰的问题, 就是粒子与反粒子的不对称性问题. 按照上述宇宙演化图像, 早期宇宙中的粒子与反粒子应该是成对产生和湮灭的, 因此现存宇宙重子与反重子的数量也应该是大体相等的. 但是, 宇宙线粒子的观测显示, 不同能段范围内反粒子的数量仅只有百万分之几到万分之一的量级, 而且这些极少量的反粒子还有可能是在高能宇宙线与星际介质的碰撞过程中产生的[6–7]. 当然, 如果仅由天文观测, 我们确实难以区分那些遥远天体是否可能由反粒子组成, 因为分别由正粒子和反粒子构成的原子、分子具有完全相同的内部电磁结构, 因而具有完全相同的光谱特征. 不过, 当正粒子组成的天体和反粒子组成的天体相互靠近时, 在其边界上必然会产生由正反粒子湮灭导致的高能伽马射线辐射. 但是, 长期以来并没有观测到这类湮灭辐射的明确证据. 因此, 不得不接受宇宙现存物质主要由正粒子构成的结论.

至于正反粒子不对称性的起因, 一个可能的解释是归因于弱相互作用中的宇称不守恒. 现有粒子理论中只参与弱相互作用的3种中微子的质量上限都低于1 eV (或者质量为零), 但是宇宙早期的夸克-胶子等离子体中可能存在过某种非常大质量的中微子, 在顶夸克开始湮灭之前的$t \sim 10^{-11}$ s时, 宇宙温度大约为$T \sim 3.4 \times 10^{15}$ K $\sim$ 300 GeV, 这种大质量中微子通过弱作用衰变产生的正、反粒子由于宇称不守恒而出现了微弱的非对称涨落, 涨落的结果导致轻子数(轻子数量与反轻子数量之差)的稍微超出(约占轻子总数的$\sim 10^{-9}$). 同时, 依据电磁相互作用规范不变性的要求, 作为对电荷守恒的补偿, 夸克-胶子等离子体中也将伴随产生严格等量的重子数(重子数量与反重子数量之差) “涨落”. 此后, 随着宇宙膨胀和温度逐渐降低, 绝大部分的正反粒子对都湮灭成辐射能量而融入到了宇宙背景辐射中, 只有极少量剩余的正物质粒子残存下来, 并构成了现在可观测宇宙中的全部物质成份. 根据宇宙现存重子-光子比的观测, 当初的正、反粒子衰变只需要有10^{-9}量级的非对称涨落, 就足以解释目前宇宙正反粒子的巨大非对称性[8].

伴随宇宙演化进入重子-轻子等离子体时代, 除了有大量重子、反重子粒子等相对稳定的粒子外, 还伴随有许多由夸克-反夸克对结合形成的π介子和反π介子等不稳定粒子. 这些不稳定介子似乎主要起到一个将宇宙能量从夸克到轻子的中介转换作用, 因为它们一旦形成, 就会通过湮灭释放光子、电子、正电子以及中微子和反中微子, 并加热这些宇宙成分. 另外, 还有极少量(约占重子总数的$\sim 10^{-9}$)因宇称不守恒涨落导致的剩余质子和中子. 当宇宙演化到$t \sim 0.01$ s时, 宇宙温度进一步降至$T \sim 10^{11}$ K以下, 剩余质子和中子将通过与背景电子、正电子以及电子中微子和反中微子的相互作用而达到热平衡, 其中中子-质子数量比可由中子与质子的质量差通过玻尔兹曼分布决定, 并随宇宙温度的降低而减少. 等到$t \sim 0.1$ s时, 宇宙温度进一步降至$T \sim 3 \times 10^{10}$ K. 这时, 弱相互作用的速率将变得慢于宇宙膨胀速率, 以致只参与弱相互作用的中微子与其他粒子解耦, 宇宙主要的热平衡过程是电子-正电子对与辐射光子的平衡. 而当$t \sim 1$ s、$T \sim 10^{10}$ K时, 宇宙背景将不足以维持质子与中子之间的反应平衡, 于是中子-质子丰度比也随即冻结在此时的玻尔兹曼平衡值, 约为1:5[9]. 这个丰度比也决定了在随后进行的宇宙原初核合成过程中形成的宇宙氦-氢丰度比. 电子-正电子对湮灭与产生之间的平衡将在宇宙温度$T \sim 3 \times 10^{9}$ K时被打破, 此时宇宙演化已进行到$t \sim 10$ s. 此后, 大量的电子-正电子对湮灭成辐射光子, 并融入进宇宙背景辐射. 而少量由于中微子衰变涨落不对称引起的少量剩余电子(约占电子总数的$\sim 10^{-9}$)残存至今, 并在后来的宇宙演化中与质子结合形成宇宙可观测物质的主要成份氢原子.

2.3 质子-电子等离子体时期(proton-electron plasma: $t \sim 10^2$–10^{13} s, $T \sim 10^9$–10^3 K)

当宇宙演化进行到$t \sim 100$ s时, 宇宙温度已经降至$T \sim 10^9$ K, 大量的正反粒子对基本都已经湮灭成了光子, 只剩下极少量(约10^{-9})残留下来的电子、质子和中子, 其中电子与质子数量相当. 正是这些残存的正物质粒子构成了现在全部的宇宙可观测物质, 它们也都被视为"正常"的正粒子, 宇宙演化也进入了由正物质占宇宙物质主导成份的**"质子-电子等离子体时期"**, 物质间起主导作用的相互作用力依然是电磁力. 随后, 大约从$t \sim 120$ s、温度$T \sim 0.9 \times 10^9$ K开始, 质子与中子开始结合形成氘核, 并进而通过核反应迅速生成更稳定的氦核(即α粒子), 直至所有的中子被耗尽. 这个核合成经历大约几分钟的时间, 由于宇宙的膨胀和冷却, 氦核已无法通过核反应生成更重的元素, 到$t \sim 10^3$ s、温度$T \sim 3 \times 10^8$ K时, 宇宙初始的元素丰度已基本确定. 其中, 由于中子的不稳定衰变(半衰期$\tau \sim 600$ s)产生质子和电子, 核合成开始时中子与质子数目比约为1:7, 核合成结束时中子耗尽, 氦核与质子的数目比约为1:12, 相应地氦丰度约为$\sim 25\%$[10].

接下来的宇宙演化进入一个相对比较和缓、漫长的演化阶段, 并在大约$t \sim 10^{11}$ s时, 宇宙温度已经降低到大约10^5 K, 低于氢原子的电离势能(~ 13.6 eV), 氢核(质子)和氦核(α粒子)开始能够俘获自由电子组成稳定的中性氢原子和氦原子, 宇宙演化进入**"复合时期"**. 这一复合时期一直持续到$t \sim 10^{13}$ s、温度约3000 K时, 大部分质子和氦核都已经与电子结合形成了中性的氢原子和氦原子. 同时, 随着复合时期的进行, 宇宙原始的电磁辐射由于不能与中性原子进行有效电磁相互作用, 以致与宇宙的物质粒子成份之间开始逐渐解耦. 期间, 宇宙也开始由原来辐射主导的状态进入物质主导的状态, 其中物质粒子的能量密度大于电磁辐射的能量密度[11]. 解耦后的宇宙辐射一直保留至今, 就是Penzias和Wilson于1965年发现的宇宙微波背景辐射[12], 只是由于伴随宇宙膨胀的冷却, 目前的温度只有约2.7 K.

在夸克-胶子和重子-轻子等离子体时期, 宇宙物质的主要成份是正、反粒子等离子体, 主导的物理过程是正、反粒子对的湮灭与产生. 而在质子-电子等离子体时期, 宇宙物质的主要成份是质子、中子和电子. 这些构成当前宇宙全部可观测物质的正物质粒子, 是早期宇宙演化过程中由于宇称对称破缺导致非对称涨落产生的微量剩余正物质, 它们在所有正、反粒子湮灭完之后, 才逐渐变成了宇宙物质的主要成份.

2.4 中性氢-氦气体时期(neutral hydrogen-helium gas: $t \sim 10^{13}$–10^{16} s, $T \sim 10^3$–10 K)

此后, 主要由氢原子和氦原子组成的宇宙中性气体在引力作用下, 通过金斯不稳定性的发展, 大约在$t \sim 10^{16}$ s开始(此时, 宇宙温度已降至大约10 K)诞生第1代恒星, 并形成星系、星系团等大尺度结构和包含众多小天体在内的恒星-行星系统. 在此过程中, 宇宙物质的主体成份是中性氢气体, 宇宙物质间起主导作用的相互作用力是引力.

不过, 在质子-电子等离子体时期, 如果能够有效地形成大尺度磁场并在复合时期之后可以继续残存剩余下来, 长程电磁力仍然有机会参与到宇宙第1代各种不同尺度天体的形成过程中. 现代天文观测显示, 从行星、恒星到星系和星系团的各种不同尺度上, 确实都存在有相应尺度的天体磁场. 关于这些天体磁场的起源, 也一直是个尚待解决的重大问题, 即所谓宇宙磁场起源问题. 无论是伴随原初大爆炸的宇宙演化学起源、还是伴随天体形成的天体物理学起源, 这些磁场的普遍存在都将可能在宇宙等离子天体结构的形成过程中扮演重要角色. 例如, 阿尔文在太阳系演化过程的研究中指出: 中性原子在引力加速落向引力中心的过程中, 如果原子动能达到其电离势能的大小, 就可能在横越磁场时发生电离并被磁场的洛伦兹力阻挡, 称为"临界电离速度现象". 利用这一临界电离速度现象, 阿尔文成功地解释了太阳系行星及其卫星形成与分布的谱带结构[13].

2.5 再电离等离子体时期(reionization plasma: $t \sim 10^{16}$ s–现在, $T \sim$10–2.7 K)

在第1代恒星诞生之后, 恒星内部和外部的中性气体分别通过热核聚变和光致电离过程, 重新回复到等离子体状态, 一般称为宇宙再电离过程, 相应的宇宙演化阶段也称为**"宇宙再电离等离子体时期"**. 宇宙进入再电离演化时期后, 宇宙等离子天体除了原来的质子-电子等离子体(即电离氢等离子体)之外, 还有那些在恒星内部由热核聚变形成的铁、氧、碳、氮等重元素, 也将在恒星演化末期以超新星爆发的形式被抛射到周围的宇宙空间, 作为超新星遗迹和下一代恒星形成的原料. 因此, 经历过再电离以后, 宇宙可观测物质依然主要呈现为等离子天体状态, 电磁力再次在宇宙物质间的相互作用过程中起着重要、甚至主导作用, 并通过引力与电磁力的共同作用, 形成目前观测到的各类等离子天体结构及其爆发活动现象. 这些等离子天体现在已经占据了99%以上的宇宙可观测物质, 相比复合时代以前的宇宙等离子体, 在成分和结构上都已经发生了重要的变化, 不仅体现为具有多离子成分的复杂等离子体, 也呈现出复杂的非均匀磁等离子体结构和剧烈的电动力学演化.

这个时期宇宙物质的分布呈现出从行星和恒星到星系和星系团的各种不同尺度的局部非均匀性, 引力和引力势能在这些非均匀性结构的形成和动力学演化中起主要作用. 同时, 在引力中心附近的非均匀势场环境中, 无碰撞等离子体的电子、离子成分由于受力状态不同, 将会产生相互分离和漂移运动, 并进而导致大尺度宏观电荷与电流分布的形成. 而在远离引力中心的星际介质中, 电磁力甚至可以远大于引力并主导星际等离子体介质的动力学结构和行为. 例如, 在日冕大气中, 质子受到的宏观电场力可以达到引力的一半, 而电子受到的宏观电场力则远大于引力. 在远离太阳的行星际空间, 即便是质子所受到的电磁力也可以远大于它们所受到的引力. 尽管等离子体微观动力学上的静电库仑力能够将电子和离子的主体成份紧密地"粘合"在一起, 但并不能完全彻底地"抹匀"宏观电荷与电流的分离现象. 另外, 由于等离子天体状态下宇宙物质的电磁特性, 使它们在引力和电磁力的共同作用下, 在各类非均匀等离子天体结构中能够自发建立起等离子天体电流回路系统, 并有效地将引力能转化成电磁能储存在这些电流回路系统中. 而这些等离子天体电流回路系统的电动力学演化及其储存的自由电磁能正是各类宇宙天体爆发活动现象最主要和普遍的驱动源.

表1总结了宇宙演化各个不同时期主要的物质成份和物理过程. 纵观上述大爆炸宇宙模型的演化历史, 自原初奇点大爆炸经历过短暂的暴胀时期之后, 宇宙的物质状态就呈现以等离子体为主的物态, 早期的热宇宙主要以夸克-胶子等离子体为主. 随着宇宙膨胀冷却、达到夸克-胶子等离子体的冻结温度$T \sim 300$ MeV ($t \sim 10^{-5}$ s)时, 夸克将被强作用力冻结禁闭在$r_{\rm b} \sim 10^{-15}$ m的尺度范围内形成稳定的重子, 即质子和中子, 宇宙的物质状态也转变为重子-轻子等离子体. 这两个时期宇宙等离子体的主体物质粒子成份都是以物质-反物质粒子对的形式存在. 在随后的宇宙演化中, 随着温度的进一步降低, 大量的粒子-反粒子对都相继湮灭成辐射光子, 释放的能量一部分加热残存的物质粒子, 一部分融入了宇宙背景辐射场、成为现在观测中宇宙微波背景辐射的组成部分. 那些由于当初宇称守恒破缺涨落造成的物质-反物质间微弱(仅约10^{-9})的不对称性, 在粒子-反粒子湮灭后残存下来组成质子-电子等离子体, 并随着宇宙演化而成为宇宙物质成份的主体. 这些质子-电子等离子体在经历过复合并在引力作用下形成恒星、星系、星系团等各类天体后, 经历再电离过程而成为现在观测宇宙中占据压倒性宇宙物质成份的再电离等离子体或复杂等离子天体. 这些复杂等离子天体通过长程电磁力和引力的共同作用, 构成了各种不同尺度下的等离子天体, 呈现出丰富的天体结构类型和爆发活动现象. 因此, 等离子体及其电磁相互作用在宇宙物质的结构形成和演化中, 必然起着必不可少的重要、甚至主导性作用. 这不仅是因为电磁力是和引力一样的长程力, 更是因为电磁力是比引力更要强$\sim 10^{36}$倍的长程力. 在接下来的第3和

第4节, 我们将从现代天文观测展示的宇宙等离子天体的分布结构特征及其爆发活动现象, 进一步阐述等离子天体物理学的研究内涵及其在现代天文学研究中的重要作用.

表 1　宇宙演化各时期的主要物质成份和物理过程

Table 1　Cosmic evolution epochs, domination substance compositions and physical processes

Epoch	Age (t/s)	Temperature (T/K)	Substance compositions	Physical processes
Primitive Planck epoch	10^{-43}–10^{-35}	10^{32}–10^{28}	Compact primitive energy pack	Cosmic expansion driven by the primitive energy pack
Cosmic inflation epoch	10^{-35}–10^{-34}	10^{28}–10^{28}	Vacuum Higgs-field particles	Cosmic inflation
Quark-gluon plasma epoch	10^{-34}–10^{-5}	10^{28}–10^{12}	Quarks, anti-quarks, and gluons	Production and annihilation of quarks and anti-quarks
Baryon-lepton plasma epoch	10^{-5}–10^{2}	10^{12}–10^{9}	Baryons, anti-baryons, leptons, anti-leptons, and radiation photons	Production and annihilation of particles and anti-particles
Proton-electron plasma epoch	10^{2}–10^{13}	10^{9}–10^{3}	Protons, neutrons, electrons, and radiation photons	Particle production and annihilation to cease and radiation photons to cooling
Hydrogen-helium neutral gas epoch	10^{13}–10^{16}	10^{3}–10	Neutral hydrogen and helium atoms and radiation photons with different temperatures	Matter particles decouple from radiation photons and form gravity-central objects in various scales via the Jeans instability under gravity
Reionization plasma epoch	10^{16}–6×10^{17} (present)	10–2.7	Proton-electron dominating nonuniform plasmas and uniform cosmic background radiation	Formed inhomogeneous plasma objects and their electric current systems drive dynamical and eruptive phenomena under the combining action of gravity and electromagnetic force

3　宇宙等离子天体的现代天文观测及其大尺度结构特征

在光学天文学时代, 能够直接观测到的天体是恒星以及由恒星组成的星系、星系团等. 恒星可见光的直接辐射源主要是恒星表面很薄的光球层(如太阳光球层的厚度不到太阳半径的千分之一), 质量也仅占恒星质量微不足道的极少量部分(如太阳光球层质量约为太阳质量的千万分之一). 恒星光球层也是整个恒星温度最低的部分, 通常为几千至一万度, 成份以中性氢为主, 一般处于局部热动平衡状态, 辐射光子主要源自氢原子的跃迁辐射, 辐射能谱表现为几乎恒定的、热平衡状态下的黑体谱. 在光球层以下, 温度向恒星中心逐渐升高, 到恒星中心可达千万度以上, 并形成一个巨大的等离子体热核聚变反应堆. 而在光球层以上, 温度向外也呈现逐渐升高的趋势, 可以达到上百万度, 形成延伸广泛的高温等离子体恒星冕, 并向外加速形成

吹向星际空间的恒星风. 因此, 除了表面温度最低的光球层之外, 整个恒星几乎都是处于等离子体状态, 是典型的等离子天体, 在光球层内部是引力约束下的高温致密等离子体, 并在核心区形成热核聚变反应堆以高能光子的形式向外不断输送恒星辐射能量, 而外部则是充满高温稀薄等离子体的延伸大气, 即恒星冕和恒星风.

3.1 宇宙等离子天体的射电观测

长久以来, 人类对恒星以外更加广袤的宇宙空间了解甚少, 因为弥散在星际空间中的星际和星系际介质在可见光波段是"不可见"的. 作为等离子体, 它们主要的电磁辐射是在射电和X射线波段. 所以, 当电磁辐射的其他波段、特别是射电和X射线波段的天文观测窗口被打开时, 一幅全新的宇宙图景呈现在了我们面前. 实际上, 早在电磁波传播现象得到实验室证实2 yr后的1890年, 人们就提出过观测来自太阳射电辐射波的建议, 只是由于探测技术的原因, 早年的努力并未获得成功. 直到1931年, 美国贝尔电话实验室年轻的电信工程师Jansky利用一个对方向敏感的天线阵, 通过1 yr的监测发现了来自银河系中心方向波长为14.6 m的天体射电辐射信号. 随后, 另一位美国的业余天文爱好者Reber进一步改进了Jansky的观测, 在1.87 m的更短波长上也观测到了来自同一方向的射电信号, 并将结果发表在美国专业的天文学杂志ApJ上, 使得Jansky的早期观测成果得到了天文学界的应有重视[14], 以至"Jansky"一词于1973年被正式采用作为天体射电辐射流量的单位, 并纳入国际物理单位系统: $1\,\mathrm{Jy} = 10^{-26}\,\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}}$. 之所以定标一个如此之低的射电流量单位, 是因为在太阳系的宇宙环境下, 我们接受到的天体射电信号都是非常微弱的, 而那些较强的射电辐射源又都来自非常遥远的活动天体. 所以, 射电望远镜堪称是世界上最灵敏的探测仪器, 也只有到了上世纪后半叶, 在战争期间发展的高灵敏度、高探测效率雷达技术的有力推动下, 射电天文学才真正开始迅速发展起来, 并取得了巨大成就. 例如, 上世纪60年代天文学的4大发现, 类星体、脉冲星、宇宙微波背景辐射以及星际分子脉泽源, 都与射电天文学有着密切联系.

在太阳系内, 射电辐射是最普遍的等离子天体电磁辐射现象. 从太阳射电暴、行星磁层射电辐射, 到行星际射电暴和太阳风-星际介质相互作用边界层辐射, 射电辐射源遍及了从太阳到日球边界层的几乎每个日球层区域. 射电辐射波段也覆盖了从$\sim 10^5$ m (太阳系边界层辐射)到$\sim 10^{-3}$ m (太阳低层大气)的8个数量级的波长范围. 而且观测显示, 这些射电爆发经常伴随太阳耀斑、日冕物质抛射、行星磁层磁暴等剧烈磁等离子体活动现象. 辐射机制的理论研究进一步表明, 这些射电暴都是由非热高能电子束通过等离子体不稳定性激发产生的集体相干辐射, 具有非常显著的非热高能特征. 考虑到太阳系只是银河系内一个极为普通的正常恒星系统, 我们有理由相信, 源自磁等离子天体的非热射电辐射现象必定遍及整个宇宙的各个区域, 是最普遍的等离子天体电磁辐射现象, 并且与等离子天体的电磁能积累和释放有密切联系.

不同于恒星光学辐射的热平衡黑体谱, 在更大的尺度上, 宇宙天体的射电辐射谱(除了宇宙微波背景辐射谱之外)也经常呈现显著的非热幂律谱观测特征. 特别是那些最强大的射电星系, 经常呈现延展至上百万光年的射电喷流和射电瓣结构, 不仅在空间尺度上远大于普通星系的尺度、达到星系团尺度的量级, 而且射电辐射光度也比其光学光度高$\sim 10^3$–10^6倍, 辐射功率高达$\sim 10^{43}$–10^{45} erg/s[15–16]. 进一步的辐射机制理论研究表明, 这些射电辐射的强大功率主要由具有幂律能谱的相对论性非热高能电子在磁场中的磁轫致辐射产生. 这意味着, 在这些大尺度延伸的射电辐射源区必定充满着十分活跃的高能等离子天体成分, 并持续释放出巨大能量, 为其中非热高能电子的加速提供驱动能源, 而磁场与等离子体及其电流系统的相互作用必定在其中起重要作用. 特别是, 像射电喷流和射电瓣这类典型的非球对称性大尺度结构的形成, 显然是非引力主导的过程, 宇宙大尺度磁场及其长程电磁力必然在这些大尺度结构的形成和宏观动力学演化中起主导性的关键作用[17–20]. 后来的X射线天文观测也进一步证实了这种等离子天体辐射与磁等离子体活动间广泛而普遍的物理联系.

3.2 宇宙等离子天体的X射线观测

电磁辐射谱的X射线波段也覆盖了100–0.01 Å的4个数量级的波长范围, 可以进一步细分为软X射线(100–1 Å)和硬X射线(1–0.01 Å). 不过, 由于地球大气吸收, X射线的天文观测必须到大气层外的空间进行. 早期针对太阳的X射线观测主要是由美国海军实验室在第2次世界大战结束以后利用高空火箭进行的, 并于1948年首次探测到来自太阳的软X射线辐射. 在随后的10 yr中, 尽管火箭观测的稳定性和指向性技术都有了很大提高, 但是由于有效观测时间太短(一般仅5到15 min), 直到1958年才利用高空气球探测第1次观测到与太阳耀斑有关的硬X射线辐射, 从此揭开了太阳高能辐射研究的序幕[21]. 显然, 为了研究与太阳耀斑活动这类瞬变现象有关的高能辐射, 需要能够进行长时间天文观测的空间观测平台.

1957年10月4日, 前苏联成功地发射了人类历史上的第1颗人造地球卫星, 开创了人类的空间科学新时代, 也为空间天文观测、特别是X射线天文学的发展提供了坚实可靠的天文观测平台. 例如, 美国“轨道太阳观测站(Orbiting Solar Observatory)”系列卫星自1962年开始发射升空后, 就观测到了大量太阳硬X射线耀斑爆发事件. 安装在1973年发射的“太空实验室(Skylab)”上具有高分辨率(角空间分辨率达5″)的软X射线成像望远镜, 清楚地揭示了日冕磁化等离子体中丰富多彩的复杂结构: 与活动区闭合磁场结构有关的“X射线冕环”、与宁静区偶极磁场相关联的“X射线亮点”以及X射线微弱的线状“暗条”和几乎没有X射线的大面积“冕洞”等[22]. 随着后来观测分辨率的不断提高, 进一步发现这些复杂的日冕结构实际上是由更加精细的“丝化”结构组成. 它们的形成和演化显然与日冕中磁场和等离子体的动力学相互作用有密切关系, 也是研究太阳大气结构状态和爆发活动现象最重要的观测资料.

在第1次探测到太阳X射线后的十几年时间里, 太阳一直是唯一观测到的宇宙X射线源, 以至人们以为在太阳系以外可能不会有强的X射线辐射天体. 直到1962年6月, 美国工程师协会(American Society of Engineers)的Giacconi等人通过安放在航空蜜蜂号火箭上的一组面积特意加大的盖革计数器, 意外地发现了来自离银河系中心不远的某个天区内的X射线源[23]. 这一发现立刻引起了对太阳X射线观测颇有经验的美国海军实验室Bowyer等[24–25]的兴趣, 他们制造了一台灵敏度比Giacconi小组的高十倍的X射线计数器, 并把仪器的观测视场限制为10°, 以便提高定位精度. 结果在距银心20°的天蝎座内探测到一个极强的X射线源(即天蝎座X-1)和另外一个在蟹状星云内的强度略低(约为天蝎座X-1的1/8)的X射线源. 虽然这一发现开创了太阳系外X射线天文学的研究, 但受限于火箭探测时效短的限制, 在最初的8 yr里进展十分缓慢. 直到1970年12月12日, 美国制造的第1颗专门的X射线天文卫星“乌呼鲁(Uhuru)”发射升空, 才真正带来了X射线天文学蓬勃发展的新时期. 在乌呼鲁X射线天文观测卫星探测到的三百多个X射线源中, 大多数被证认为银河系内的密近双星系统和超新星遗迹以及河外的活动星系和星系团[22]. 乌呼鲁最重要的发现是证认出许多银河系内的强X射线源为具有质量交换的密近双星系统, 即是由一颗致密星(白矮星、中子星或许还有黑洞)和普通恒星组成的双星系统, 其中的致密星通过引力不断地从其正常伴星吸积物质, 并在自身周围形成一个“吸积盘”. 而吸积盘内的物质由于“相互摩擦”失去角动量, 从而不断“落向中心”并释放出“引力能”. 释放的引力能将吸积盘加热至百万甚至10亿度的量级, 并最终产生出比太阳总辐射还要高3、4个数量级的强烈X射线辐射. 这种致密天体的吸积盘模型后来被广泛应用于活动星系核等高光度剧烈活动天体现象的理论研究, 成为构造其中心“驱动引擎”的典型模板, 因为像中子星、黑洞这类致密天体的引力吸积过程释放能量的效率比恒星内部的热核聚变反应还要高十几甚至几十倍. 乌呼鲁卫星的另外一个重要发现是星系团内的星系际空间充满了温度高达10^6–10^9 K稀薄热气体, 这些热气体的起源和加热机制以及在星系团动力学演化中的作用, 至今仍然都是尚待解释的谜团[26].

乌呼鲁卫星的发现极大地鼓舞了世界各国对X射线天文学研究的信心, 美国、前苏联、日本和欧洲相继发射了一系列的X射线天文卫星.

像1978年11月美国发射的“爱因斯坦天文台”X射线天文卫星以及后来90年代发射的欧美联合的“伦琴软X射线卫星(Röntgen Satellite, ROSAT)”、美国的“钱德拉X-射线卫星(Chandra X-ray Observatory)”和欧洲的“X-射线多面镜卫星(X-ray Multi-Mirror Mission)”等具有更高探测精度的X射线天文卫星, 都极大地丰富了宇宙高温等离子体的分布图景. 例如, 爱因斯坦天文台不仅仪器灵敏度比以前提高了1000倍, 而且第1次实现了对太阳系外X射线源的高分辨成像观测(空间角分辨率为2″). 通过这些X射线天文卫星的观测, 发现各类恒星均有X射线发射, 亮度从太阳光度的10^4到10^{-4}倍, 这意味着几乎所有恒星都存在类似于日冕一样的由高温等离子体组成的“恒星冕”和类似太阳耀斑的爆发活动现象[27–31]. 图1显示了约2000颗具有X射线冕的恒星的赫罗图, 其中圆圈的大小表示恒星冕的X射线强度(如图中左下角所示, 单位erg/s. 作为比较, 宁静日冕的X射线光度大约10^{26} erg/s), 不同颜色标记来自不同的统计资料[31]. 从图1不难看出, 恒星冕及其光度在恒星赫罗图上的分布相当广泛, 几乎遍及各类恒星的不同演化阶段, 而且光度变化范围也跨越好几个数量级. 包括日冕在内, 这些普遍存在于各类恒星的星冕加热机制一直是天体物理学中尚未解决的一个基本问题.

借助于这些X射线卫星的高分辨观测, 不仅第1次发现了河外星系内作为单个X射线源的恒星冕, 而且还更进一步发现存在星系团尺度上的星系际热气体分布, 并分辨出这些星系团内热气体分布的“精细结构”. 这意味着星系团内可能存在类似日冕磁等离子体大气的活动现象, 只是在规模和尺度上要大得多. 图2左图显示了通过伦琴卫星得到的由上千个星系组成的后发星系团(Coma galaxy cluster)的软X射线分布(暗红色), 其中灰色亮点是由Palomar巡天望远镜给出的可见光波段的星系成像[26]. 这里的X射线像清晰地显示了星系团作为宇宙最大尺度“天体”的整体独立性和结构完整性, 其主体是尺度高达上亿光年的高温热等离子体. 由图2左图可见, 其中心区有两个庞大的巨型椭圆星系, X射线亮度显著增强的致密核心区以此为中心, 覆盖尺度达数百万光年. 图2右图显示了核心区热等离子体压强分布的湍动结构, 最大湍动尺度可达近50万光年[32].

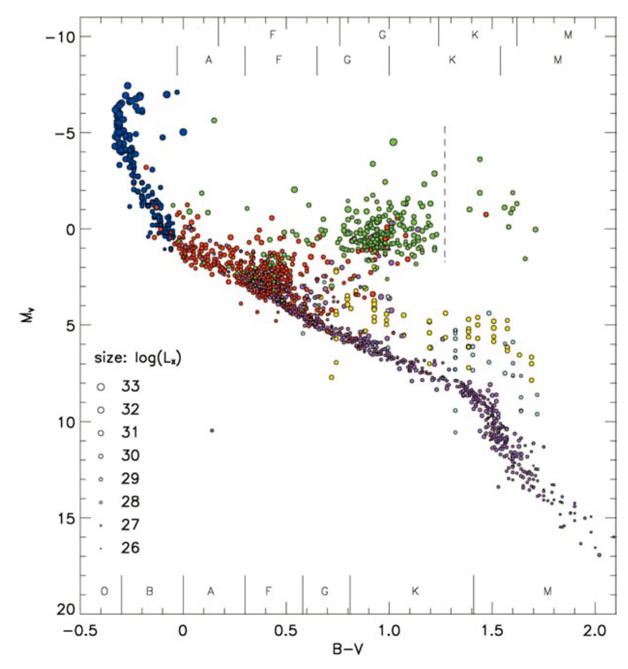


图 1 恒星冕的X射线观测. 这个恒星赫罗(H-R)图里包含了约2000颗已观测到X射线冕的恒星, 其中圆圈的大小表示恒星冕X-射线强度的对数值$\lg L_x$ (作为比较, 宁静日冕的X射线光度$L_{\rm SX}\sim 10^{26}$ erg/s), 不同颜色标记来自不同的统计资料[31].

Fig. 1 X-ray observations of stellar coronas: the H-R diagram based on about 2000 X-ray detected stars, where the size of the circles characterizes $\lg L_x$ (in comparison, the X-ray luminosity of the quiet solar corona $L_{\rm SX}\sim 10^{26}$ erg/s) and different colors denote different data[31].

在一些中心天体为活动星系核的星系团中, 还呈现出类似太阳活动区展现的喷流、空腔、激波等复杂的大尺度动力学结构. 例如, 图3 (a)和(b)分别呈现了由钱德拉(Chandra)卫星得到的室女座星系团(Virgo cluster)和英仙座星系团(Perseus cluster)中心区域的X射线成像[33]. 从图3 (a)可以清晰地看到从中心巨椭圆星系M87喷射出来的相对论性高能等离子体喷流以及多重环状结构, 图3 (b)则显示了英仙座星系团内复杂的空腔、环、波阵面相互交织的磁等离子体动力学结构.

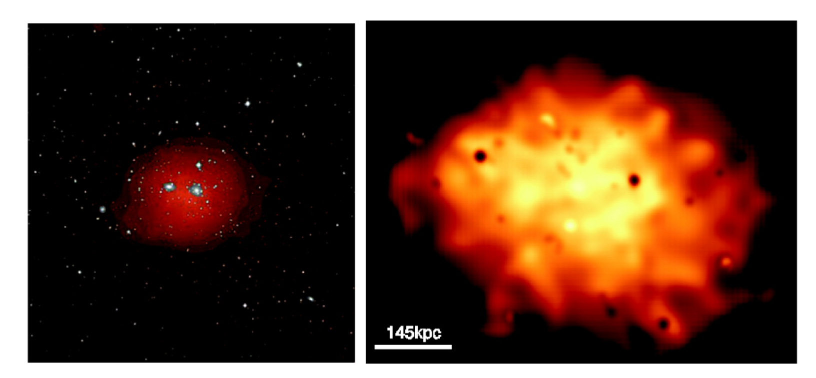


图 2 左图: 后发星系团高温等离子体X射线强度分布(暗红色, 来自ROSAT巡天观测)[26], 右图: 对应的等离子体压力分布的湍动结构[32]. 为了对比起见, 左图中叠加上了星系的光学像(灰色亮点, 来自Palomar巡天成像).

Fig. 2 Left panel: a composite image of the Coma galaxy cluster with X-rays in the ROSAT All-Sky Survey (underlaying red) and the optically visible galaxy distribution in the Palomar Sky Survey Image (grey spots)[26] and right panel: the turbulent eddy structure of the plasma pressure in the central region of the Coma cluster[32].

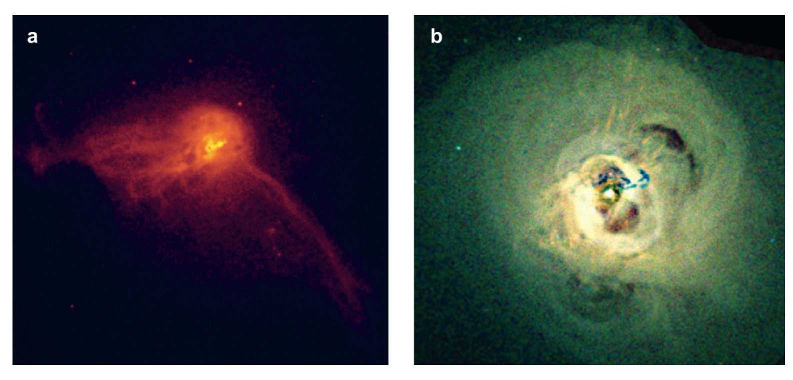


图 3 由钱德拉卫星观测发现的室女座星系团椭圆星系M87 (a)和英仙座星系团(b)中高温热等离子体复杂的大尺度结构: 喷流、等离子体环、空腔、激波等[33].

Fig. 3 Complex large-scale structures of high-temperature plasmas in M87 (a) and in the Perseus cluster (b): jets, plasma loops, cavities, shocks, etc (from Chandra X-ray Observatory)[33].

不仅在靠近星系团中心区域分布着比较致密的高温等离子体(亦称星系团内热介质), 它们也是宇宙间延展尺度最大的X射线辐射源, 而且即使在远离星系团中心的星系团间更加广大的宇宙空间里, 也可能存在大量的稀薄高温等离子体介质. 近年来, 通过对高温热电子与宇宙微波背景辐射光子之间逆康普顿散射引起的所谓Sunyaev-Zeldovich效应的观测研究, 已经证实星系团间的广袤空间也是被稀薄的高温等离子体所填充的[34–37]. 实际上, 综合各种不同电磁辐射波段的天文观测显示, 90%的宇宙可观测物质都是以星系晕、星系际或星系团间热介质的形式弥散地分布在广袤的宇宙空间里. 而传统光学天文学观测中的恒星、星系等聚集类天体物质仅占宇宙可观测物质总量的10%[37–39]. 这些占据宇宙可观测物质主体成份的弥散热介质一般都是温度高达10^6–10^9 K的高温等离子体, 弥漫在广袤的宇宙星系际空间中. 在伴随宇宙膨胀冷却的演化过程中, 这些弥漫于整个宇宙空间的稀薄高温等离子体的起源和加热机制一直是个未解之谜[26, 33, 40–41]. 它们在宇宙大尺度结构形成的动力学过程和天体爆发活动现象的能量转化过程中, 必将起着关键性的重要作用, 是未来宇宙演化学和天体物理学必须考虑的重要问题, 也是等离子天体物理学需要研究的基本课题之一.

3.3 宇宙等离子天体辐射与磁场的相关性

依据宇宙等离子天体射电辐射机制的相关理论, 天体射电辐射主要是非热高能电子在磁场中的磁韧致辐射(如射电星系的回旋同步加速辐射或射电脉冲星的曲率辐射)[15–16, 42], 它们的辐射能量损失率(或即射电辐射光度)与天体磁场必然有着密切联系. 而另一方面, 主要由高温等离子天体中热电子与离子碰撞的库仑韧致辐射产生的X射线辐射, 其辐射光度只与等离子天体的温度和密度有关, 与天体磁场没有直接关系. 不过, 大量观测的统计分析显示, 等离子天体的射电辐射光度和X射线光度之间, 在非常广泛的尺度范围内, 都存在一致良好的相关性. 图4左图显示太阳耀斑和一些恒星冕在X射线和射电波段辐射光度在跨越近10个数量级的范围内都呈现出良好的一致相关性[43], 而图4右图进一步显示了从X射线双星到活动星系核这类强辐射源的X射线和射电辐射光度之间高度一致的相关性更是跨越了15个数量级的宽广尺度范围[44]. 这些射电辐射和X射线辐射不仅具有完全不同的直接发射源(分别是非热高能电子和高温热电子), 相应的辐射机制(分别是磁韧致辐射和库仑韧致辐射)也完全互不相干, 它们辐射光度之间广泛一致的高度相关性意味着这两类辐射过程背后必然有着某种高度相关、甚至共同的能量供应机制, 并且能够非常有效地加速非热高能电子和加热高温等离子体. 在能够同时满足这些条件的能量供应机制中, 磁场及其磁能无疑是最适宜扮演重要角色的候选者, 有关等离子天体X射线光度和磁场通量的观测统计分析也进一步证实了这一点.

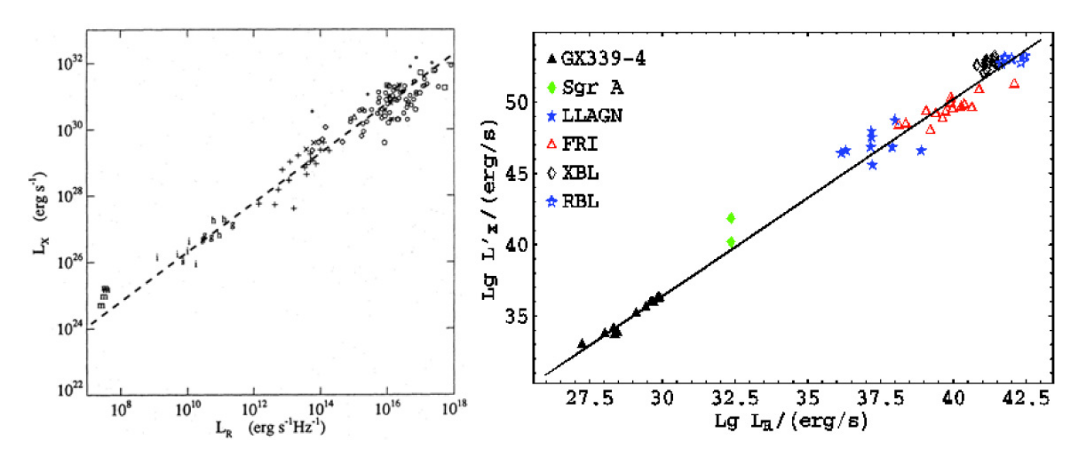


图 4 左图: 太阳耀斑和活动冕恒星在X射线和射电波段辐射光度的相关性[43]; 右图: X射线双星与活动星系核在X射线和射电波段辐射光度的相关性[44].

Fig. 4 Left panel: X-ray and radio luminosity correlation for solar flares and active-corona stars[43]; Right panel: X-ray and radio correlation for X-ray binaries and active galactic nuclei[44].

图5左图显示了太阳冕环的X射线强度与相应冕环磁场强度间的幂律相关性[45], 其中不同颜色对应于处于太阳磁活动不同衰退期的6组太阳卡林顿周, 覆盖了冕环磁场强度的较大变化范围. 图5左图显示的幂律相关性意味着太阳冕环的加热机制与冕环磁场有着密切的内在物理联系, 并且加热效率与磁场强度呈现正相关的趋势. 而图5右图则将这种X射线光度与相应磁通量间的幂律相关性进一步从太阳延伸到其他活动天体[46], 在跨越十几个数量级的尺度变化范围内依然具有很好的幂律正相关特征, 进一步证明磁场与等离子体加热机制之间的内在物理联系普遍存在于宇宙高温等离子体的加热现象中.

基于在宇宙天体结构的不同尺度上都普遍存在有磁场和高温等离子体这一现代天文学观测事实, 我们建议动力学阿尔文波可以作为宇宙高温等

离子天体的普适加热机制[47]. 实际上, 宇宙等离子天体的一个普遍特征就是具有较高的自由能, 在引力中心附近, 这些自由能提供了天体爆发活动现象的驱动能源, 伴随的能量释放也可能会导致一些局部和瞬变的加热现象. 但是, 对于持续维持在高温状态、特别是那些远离引力中心的星系际高温等离子体, 维持它们的高温状态需要一种能够持续稳定并普遍发生的加热机制. 现代天文观测显示, 广袤的宇宙空间中普遍存各种尺度的磁场. 当磁场出现的时候, 磁力线的任何振荡都将不可避免地激发阿尔文波扰动, 因此也必然会在广泛的宇宙空间中形成普遍存在的阿尔文波湍动. 依据星际介质中阿尔文波湍动的Goldreich-Sridhar理论[48–50], 阿尔文波湍动的非线性波-波耦合将导致湍动波能量向小尺度的转移, 直到接近等离子体粒子的微观动力学尺度而演变成动力学阿尔文波湍动, 并通过动力学阿尔文波与粒子间的波-粒相互作用来实现波与粒子间有效的能量、动量交换, 进而加热或加速等离子体粒子. 这一普适物理图像应用于结构化的日冕加热现象时, 能够很好地解释日冕加热的磁相关性和结构非均匀性特征[51–54]. 基于宇宙各类不同尺度等离子天体X射线光度与磁场间普遍一致的相关性, 我们有理由相信基于动力学阿尔文波的日冕加热机制也同样能够成为对其他宇宙高温等离子天体普适有效的加热机制[47].

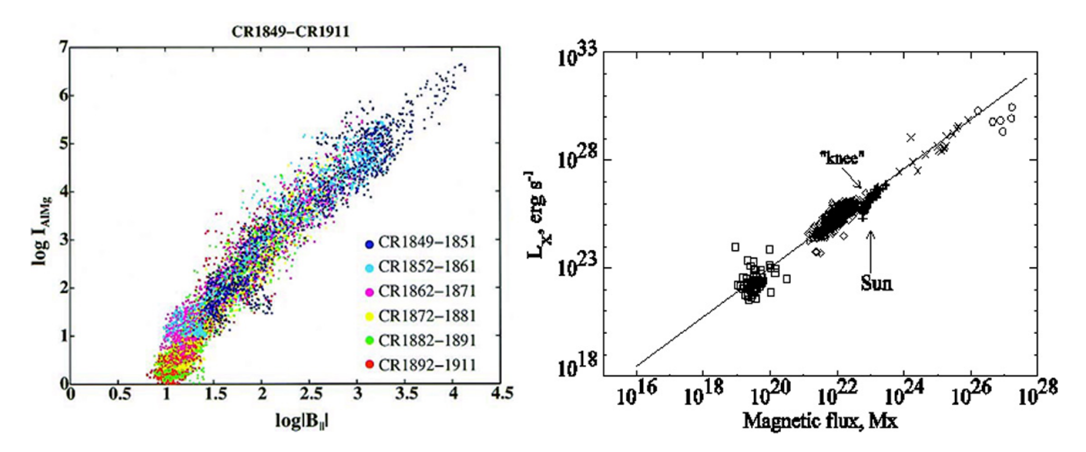


图 5 左图: 太阳冕环X射线强度与冕环磁场强度的相关性, 覆盖一个太阳磁活动衰退期(1991年11月11日至1996年7月25日), 其中不同颜色代表不同磁活动衰减期的卡林顿自转序号[45]; 右图: 太阳部分区域和活动冕恒星X射线光度与相应磁通量的相关性[46].

Fig. 5 Left panel: the correlation between X-ray intensity and magnetic field strength for solar coronal loops, covering a whole declining duration of solar magnetic activity (from Nov. 11 1991 to July 25 1996), where the different colors denote the different Carrington Rotation numbers as shown in the figure[45]; Right panel: the correlation between X-ray intensity and magnetic flux for solar active regions and active-corona stars[46].

4 宇宙等离子天体的爆发活动现象及其能量转换机制

现代天文观测技术向全波段天文学的扩展, 不仅催生了射电天文学、X射线天文学等新型天文分支学科, 展示了一幅前所未见的宇宙物质分布与结构图景, 也极大地拓展了天体物理学的研究视野并导致研究方向的重大转变, 特别是天体高能爆发活动现象(如地球极光与磁暴现象、太阳耀斑爆发和日冕物质抛射以及超新星爆发、河外射电喷流、宇宙伽马暴和快速射电暴等)及其动力学驱动机制成为了当代天体物理学研究的主流方向, 也是等离子天体物理学研究的重要课题. 在各类天体爆发活动现象及其驱动机制中, 涉及到的基本问题之一就是爆发能量的储存、输运和释放过程的能量转换机制.

在人类现代社会生活中, 最熟悉的能量传输与转换机制就是发电机及其电力输运系统. 实际

上, 类似的“发电机与电力输运系统”在天体爆发活动现象中也经常起重要作用. 例如, 地球磁暴和极光背后的驱动系统就是太阳风-磁层-电离层耦合形成的所谓全球电流系统电动力学演化的直接结果. 全球电流系统主要由以下几个电流回路相互联结而成: (1)沿磁层顶界面的**磁层顶电流**(亦称Chapman-Ferrano电流)、(2)环绕磁尾柱面的**磁尾电流**、(3)沿磁尾中性片流动的**中性片电流**、(4)磁层辐射带内环绕地球的**环电流**、(5)沿地球极区磁力线的**场向电流**(亦称Birkeland电流)以及(6)**电离层电流**[47, 55]. 其中, 磁层顶电流和磁尾电流主要由太阳风与磁层相互作用驱动形成的沿磁层边界层流动的面电流, 也是全球电流系统的主要驱动“发电机”. 中性片电流主要由磁尾南北两瓣磁力线在赤道面反向而造成的沿磁中性面的电流. 环电流则是主要由磁层辐射带高能粒子横越地球偶极磁场磁力线的漂移运动而形成, 也是导致地球磁暴的直接驱动电流, 而极光(或称亚暴)则主要由极区场向电流驱动, 一般与磁尾和中性片电流活动沿磁场向地球极区的注入有关. 至于电离层电流, 则是由Pedersen电流和Hall电流两部分组成, 分别源自电离层电子和离子在电场和碰撞双重作用下导致平行于和垂直于电场的相对漂移而形成, 也在极区场向电流间起回路链接作用. 在太阳风相对宁静期间, 正是全球电流系统产生的磁场导致了地球磁场对偶极磁场的偏离, 形成磁层顶和磁尾结构的严重不对称性. 而当太阳风剧烈扰动时, 通过太阳风-磁层相互作用边界层的能量动量输入, 将会驱动全球电流系统的强烈扰动, 进而引起磁层环电流和极区场向电流的急剧增强, 并最终通过触发地球磁暴和磁层亚暴来释放储存在全球电流系统中的“超载”能量[56].

空间卫星的实地探测已经为地球磁层全球电流系统理论提供了坚实的实验基础[57]. 基于太阳日冕-色球-光球大气结构和地球磁层-电离层-中高层大气结构在微观等离子体磁化特性和宏观电动力学耦合特性两个方面上的高度类似性[58–62], 我们有理由相信在太阳大气中存在类似磁层全球电流系统的太阳磁等离子体大气电流系统, 它们的电动力学演化和爆发式放电过程才是太阳耀斑和日冕物质抛射等爆发活动现象的物理驱动机制[55, 63–73]. 不同于地球磁层电流系统的驱动发电机来自外部太阳风与磁层相互作用边界层, 太阳大气磁等离子体电流系统的驱动发电机则更可能主要源自太阳内部对流层及其驱动下的光球层湍动.

正如阿尔文在其《宇宙等离子体》一书中指出的[55], 上述地球磁层电流系统和太阳大气磁等离子体电流系统可能只是一个具有更大空间尺度和更高承载能量的日球电流系统的一部分. 整个日球电流系统将太阳内部的热核聚变反应堆, 经太阳大气、太阳风, 直到日球边界层, 与银河系星际介质和磁场链接起来. 太阳大气电流系统、日球层电流片、行星际日冕物质抛射载流环、日球边界层电流以及地球和其他行星的磁层电流系统, 都将是整个日球电流系统的组成部分. 类似于太阳的日球电流系统, 其他恒星也可能存在类似的“星球电流系统”, 而恒星内部的热核聚变反应堆和外部星系环境介质与恒星风相互作用边界层都可能提供星球电流系统的驱动发电机.

阿尔文甚至将这类日球或更一般的星球电流系统推广应用到河外射电星系, 成为具有星系际尺度的星系电流系统. 天鹅座A射电源是最早发现、也是观测到辐射通量最强的射电星系, 其射电辐射功率高达$\sim 10^{44}$ erg/s, 是银河系射电辐射功率的$\sim 10^{6}$倍. 图6左图显示了天鹅座A巨大的射电喷流和射电瓣结构, 其中心有一个暗弱的椭圆星系, 而右边则是联结中心星系核(星系级旋转黑洞)和射电瓣的星系电流系统示意图[55]. 在这个星系电流系统中, 沿星系轴的电势分布能够加速高能带电粒子并形成沿星系轴的主要电流通道, 其中的相对论性高能电子既是星系电流系统的主要载流子, 也是产生射电喷流和射电瓣的直接辐射源[74], 而中心超大质量旋转黑洞的强引力场或周围星系际高温等离子体与星系或宇宙磁场的相互作用则可能是提供星系电流系统主要的驱动发电机.

结合活动星系射电辐射和X射线辐射观测所显示的相对论高能电子束流和高温等离子体的空间分布, 似乎也印证了与这类超大尺度星系电流系统相应的星系电路结构确实存在的可能性. 图7显示了星系团MS 0735.6+7421的射电辐射(红色, 由

VLA观测)和X射线辐射(蓝色, 基于钱德拉卫星的观测)的分布, 为了对比起见, 星系团内的星系分布(白色, 由Hubble空间望远镜拍摄)也叠加在图中[33]. 如图所示, 射电辐射与X射线辐射具有显著不同的空间分布特征, 意味着代表相对论性高能电子束流的射电喷流从中心星系开始沿星系轴线向两边延伸, 而代表高温等离子体的X射线辐射则环绕射电喷流呈轴对称的晕状分布. 这与图6显示的星系电流系统在空间分布特征上具有很好的可类比性. 而另一方面, 非热高能电子与高温等离子体这种不同等离子体成份被明显区隔的空间分布特征也意味着必然存在大尺度的星系磁场, 并在星系电流系统形成和演化的电动力学过程中起重要作用.

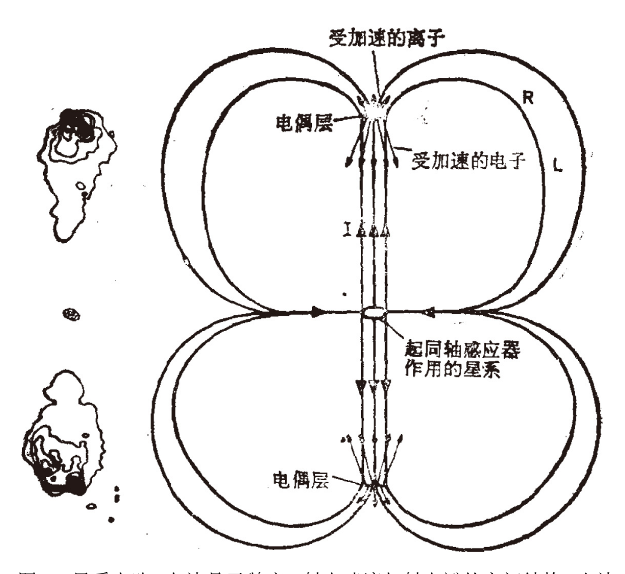


图 6 星系电路. 左边是天鹅座A射电喷流与射电瓣的空间结构, 右边是星系电流系统示意图[55].

Fig. 6 The galactic circuit in the Cygnus A. The left is the radio jets and lobes in the Cygnus A and the right is the sketch map for the galactic circuit[55].

现代天文观测和宇宙演化理论都显示, 自进入再电离等离子体宇宙以来, 可观测物质的分布在金斯引力不稳定性的作用下, 形成从行星、恒星到星系、星系团等不同尺度的局部引力中心, 并朝着越来越高度结构化的方向演化. 在周围物质向局部引力中心坍缩的过程中, 引力势能被转换成动能(或热能)、等离子体湍动波能以及电流系统的电磁能等其他形式的能量. 特别是在局部引力中心造成的非均匀环境中, 再电离等离子体由于离子和电子成份之间荷质比的显著差异, 将在引力坍缩过程中产生宏观的分离运动, 并进而形成局部电荷与电流分布. 由于等离子体的集体相互作用特性, 这些局部电荷与电流分布最终将通过自组织的方式形成复杂、但相对稳态的电流系统, 并以宏观电磁能的方式将大量能量储存在电流系统的“电偶层”和“电感”等分布区域. 正是这些储存在等离子天体局部电流系统中的电磁能为天体爆发活动现象提供了主要的驱动能源, 当它们积累到一定阈值、超过准稳态电流系统的承载负荷能力时, 就会触发电流回路的不稳定性, 从而导致储存电磁能的爆发式释放. 这些爆发释放的电磁能主要通过等离子体不稳定激发过程, 激发产生大量等离子体湍动波, 使得原本处于准稳态的背景等离子体迅速进入强湍动状态, 进而通过等离子体波粒相互作用过程加速产生非热高能粒子和加热形成高温等离子体, 并分别成为等离子天体的射电和X射线辐射的主要直接辐射源.

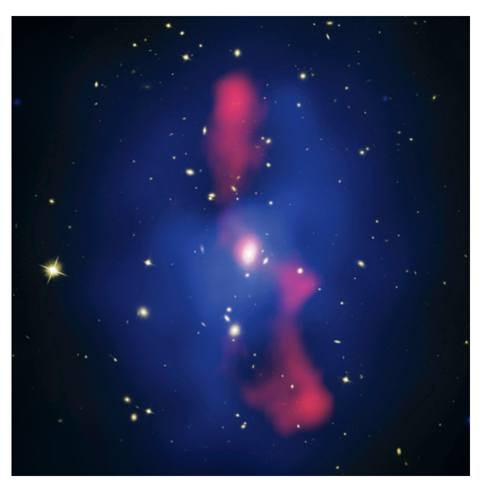


图 7 星系团MS 0735.6+7421的射电辐射(红色, 由VLA (Very Large Array)观测)和X射线辐射(蓝色, 基于钱德拉卫星的观测)的分布. 其中, 白色斑点是该星系团中可见星系的分布(来自Hubble空间望远镜的观测)[33].

Fig. 7 The composite of the radio image (in red obtained by the Very Large Array) and X-ray image (in blue by the Chandra) of the MS 0735.6+7421 cluster, where the white spots are visible galaxies in the cluster (the Hubble Space Telescope)[33].

在这幅引力能通过等离子天体电流系统转换、储存进电流系统的宏观电磁能, 并进而通过"超载"不稳定性爆发释放, 最终导致宇宙天体爆发活动现象的物理图景中, 宇宙背景磁场必将扮演关键性的重要角色, 甚至主导着局部准稳态电流系统的形成过程和结构分布. 正如现代天文观测揭示的, 遍布宇宙空间的高温等离子体是构成宇宙可观测物质的主体成份, 现代天文观测也显示磁场的存在和结构几乎贯穿了从行星、恒星到星系、星系团的各种天体尺度[17]. 关于这些磁场的起源问题, 一直存在广泛争议, 是个悬而未决的待解之谜. 主要观点可以分成两大类, 一类是所谓的宇宙起源理论, 即在极早期宇宙可能产生所谓的"种子"磁场, 它们随着宇宙演化像宇宙背景辐射一样地残留至今, 并在引力坍缩过程中被等离子体流拖拽"压缩"进局部引力中心; 另一类是天体起源理论, 即伴随等离子天体结构的形成通过发电机机制而自发产生[75–76]. 不过, 无论它们的起源是什么, 正如阿尔文早年就指出的: **宇宙到处都存在有磁场, 等离子体与磁场的相互作用对空间和天体物理都具有重要意义**[77].

毫无疑问, 传统的天文学一直以来都是一门建立在天文观测基础上的现代科学, 也正是由于在天文观测技术上从可见光窗口到全波段观测和从地面观测到大气层外的空间观测这两大突破, 给人类展现了一幅全新的宇宙图景. 其中, 占宇宙可观测物质90%的主导成份不是成群地散落在浩瀚宇宙空间中闪烁着星光的恒星、星系, 而是像宇宙背景辐射那样弥漫并充满了整个宇宙空间的高温等离子体. 同时, 在长程电磁力与引力的共同作用下, 它们在宇宙空间中的分布既不像背景辐射那样均匀, 也远没有像恒星、星系那样地集中. 而且, 特别是这些相对弥散的宇宙等离子天体由于粒子间长程电磁力的耦合所导致的集体相互作用特性, 使它们呈现出远比中性物质复杂得多的微观动力学过程和宏观动力学演化. 不过, 这些复杂的动力学特征大都不能直接反映在它们的电磁辐射中, 以致我们从天文观测难以获得有关这些等离子天体的动力学特性. 例如, 等离子天体中的复杂波动状态及其波粒相互作用过程、载流磁通量管和无碰撞激波等大尺度磁化等离子体结构以及准稳态电流系统的结构和演化过程, 都难以通过辐射电磁波的天文观测获得合理的物理推测和诊断, 因为它们与等离子天体辐射电磁波的产生没有直接关联, 在天文观测中是"不可见"的现象. 不过, 等离子天体的集体动力学行为一般都符合所谓的"标度律", 即具有相同无量纲标度参量的等离子天体也具有类似的集体动力学行为. 这使得实验室等离子体测量和空间等离子体实地探测的结果可以适当外推到其他遥远等离子天体环境中, 为现代等离子天体物理学的研究提供了除天文观测之外的另一种可能的研究手段.

5 等离子天体物理学的天然实验室: 空间等离子体的卫星实地探测研究

尽管早在100 yr前萨哈方程提出的时候, 人们就意识到宇宙可观测物质的99%以上可能都是处于第4态的等离子体, 但是真正认识这些宇宙等离子体的具体结构和存在方式, 还是直到人类进入空间时代以后的事情. 自从1957年第1颗人造卫星发射进入地球大气层外空间以来, 空间等离子体的卫星实地探测已经为我们揭开了一个完全不同于地面中性气体环境的物质世界. 不仅证实了此前有关地球大气层空间环境和日地关系的一些猜想, 更发现了大量出乎意料的等离子天体的磁化结构和物理状态, 它们远比此前想象的复杂.

在人类空间探测活动开始之前, 就已经认识到了太阳和地球除了阳光之外必定还存在某种别的直接联系. 早在19世纪中期, 人们根据长期积累的太阳黑子和地磁扰动(即磁暴)观测资料发现"地磁扰动强度与太阳黑子周期有关", 特别是在1859年9月1日, 英国天文学家卡林顿(Carrington)在描画太阳黑子群时突然发现太阳爆发了一个大耀斑[78]. 而大约16 h后位于伦敦的地磁观测站记录到了明显的地磁扰动, 有记载以来最强烈的磁暴发生了, 并同时伴有很强的极光出现, 这表明地球磁暴和极光确实与太阳耀斑等爆发活动现象有某种关联. 大约在20世纪初, 挪威物理学家伯克兰

将汤姆逊发现的电子学说应用于他的极光理论, 进一步指出引起磁暴和极光的正是来自太阳耀斑的电子束[79]. 在20世纪30年代, 查普曼(Chapman)和菲拉罗(Ferraro)系统地发展了这种从太阳发出的等离子体流与地球磁场相互作用的理论模型, 建立了地球磁层结构的早期概念"磁腔(cavity)", 并进而对磁暴形成的物理机制提出了解释[80–81]. 当人类自1957年进入空间时代以后, 上述有关太阳风等离子体流的存在及其与地球磁场的相互作用所造成的磁场拖曳和对地磁活动与极光影响的假说和理论, 很快就为空间卫星的实地探测所证实. 同时, 也发现无论是太阳风还是地球磁层, 它们的结构状态和动力学过程都远比原来假设的复杂.

首先是美国爱荷华(Iowa)大学的范·艾伦(Van Allen)教授利用美国紧随苏联之后于1958年发射的头两颗空间探测卫星"探险家1号和2号(Explorer-1 and-2)"上的宇宙线探测器发现了磁层内的高能粒子辐射带(现在称为"范·艾伦辐射带"), 其内充满了被地球偶极磁场捕获的能量范围从1 keV到100 MeV的高能带电粒子, 其能量远远高于太阳风粒子热能, 相应的能化机制至今依然是个开放的问题[82]. 这些被地球磁层所捕获的辐射带高能带电粒子环绕地球的漂移运动形成环电流, 并构成磁层全球电流系统的一部分, 只是由太阳风剧烈扰动引起环电流的突然增强才是导致地球磁暴的直接原因. 而另一方面, 作为除阳光之外人类唯一能肉眼可见的日地联系现象—极光, 也不像原来想象的那样简单, 是由来自太阳的高能粒子直接沿地球磁场向下传播所致. 综合卫星穿越极区的大量观测资料显示, 直接导致极光产生的高能电子主要来自地球极区上空约5000 km到10000 km的磁层内部, 称为"极光加速区", 能量主要分布在1–10 keV的范围[83]. 加速机制普遍认为与极区存在场向电场及其场向电势降有关, 后者则可能源自太阳风扰动引起磁尾中性片电流强烈扰动、甚至引发磁场重联, 并进而导致极区场向电流(亦称"Birkeland电流"或"极光电流")的急剧增加, 但具体物理机制也依然存在各种争议[47, 84–86].

另外, 当20世纪六七十年代发射的探险家10号和12号(Explorer-10, -12)、水手2号(Mariner-2)以及太阳神1号和2号(Helios-1, -2)相继穿越磁层顶进入外层行星际空间后, 发现行星际空间确实存在有来自太阳方向、速度高达每秒几百公里的连续超声速等离子体流, 并实地探测到其平均密度在1–10 cm^{-3}之间、温度在10^5 K左右、磁场在10^{-5}–10^{-4} Gs之间, 主要成分为电子、质子, 大约4%为α粒子. 特别是, 在超声速的太阳风等离子体流中不仅普遍存在有大量的各种模式等离子体波及其强湍动, 而且还经常伴随有各种大尺度磁化等离子体结构[87]. 例如, 当探险家12号(Explorer-12)穿越磁层顶进入太阳风时, 发现太阳风在到达磁层顶之前发生了一次突变. 后来发射的许多进入太阳风行星际空间的卫星探测也都清楚地表明了太阳风在靠近磁层附近的这一突变层的存在. 太阳风的这一突变层实际上是由于超声速的太阳风等离子体流遭遇到地球磁层的阻碍而产生的激波, 但是激波层的厚度却只有离子动力学尺度的量级, 远远小于太阳风粒子的平均碰撞自由程. 这一"无碰撞激波"的发现着实让当时的空间物理学家们大吃一惊, 因为在普通气体中激波的形成是因为超声速流引起的非线性陡化效应与粒子碰撞耗散效应相平衡时形成的一种稳定结构, 其典型厚度应为粒子平均碰撞自由程的量级. 然而, 进一步的探测发现行星际太阳风等离子体中普遍存在有这类"超薄"的无碰撞激波结构, 有的甚至薄到只有电子惯性长度的量级. 尽管这类无碰撞激波的形成机制仍然是一个有待解决的开放问题, 但是它们独特的磁等离子体结构却使其能够提供一个非常有效的粒子加速与加热机制, 并在高能天体物理现象中得到了广泛应用[88].

另一个重要的发现是关于行星际磁云的观测. 1981年, Burlaga等人通过结合Voyagers、Imp 8和Helios等多卫星观测资料的综合分析, 发现行星际太阳风中存在一类具有螺旋型磁力线的"磁环"结构, 称为"行星际磁云", 它们具有如下3个主要观测特征: (1)磁场强度显著增强; (2)磁场方向连续光滑旋转; (3)等离子体动压-磁压比明显降低[89]. 这类事件随后被证实为太阳爆发活动期间, 直接从太阳大气抛射进入行星际空间传播的载流磁通量管, 携带的总能量在其典型的尺度分布范围0.01–

0.25 AU内, 呈现类似太阳耀斑的负幂律能谱[90–91]. 这一发现揭示了载流磁通量管, 或者依照阿尔文称之为“等离子体电缆(plasma cables)”[55], 作为等离子天体电流系统的一个组成部分, 可能普遍存在于各类宇宙等离子天体中, 并成为等离子天体电流系统电动力学演化的重要环节. 它们在行星际传播过程的卫星实地探测研究, 对于我们更好地理解其他等离子天体电流系统的结构状态和动力学演化具有不可替代的实验价值和典范意义.

随着Voyager 1、2号卫星相继穿越太阳风终止激波和日球层顶[92], 人类卫星空间实地探测的范围已经穿越日球边界层、进入星际空间环境, 并发现类似地球磁层与太阳风相互作用形成的磁层顶、磁鞘、舷激波等组成的复杂边界层结构, 在日球太阳风与星际介质的相互作用区域也存在由太阳风终止激波、日球鞘层、日球层顶等构成的日球边界层结构[93]. 毫无疑问, 电离层和磁层结构、范·艾伦高能粒子辐射带及其等离子体波动、磁层顶、磁鞘和舷激波、太阳风超声速等离子体流及其湍动波、行星际无碰撞激波、共转相互作用区、日球电流片和行星际磁云的载流磁通量管以及地球磁层全球电流系统和日球电流系统等一系列卫星实地探测的新发现, 已经彻底更新了我们对近地空间环境和日球层等离子体结构的认知.

按照阿尔文的建议[55], 由此外推到其他遥远的宇宙等离子天体系统, 不难想见在行星、恒星、星系、星系团等局部引力中心及其环绕等离子天体介质的边界周围, 可能普遍存在有类似将其包裹起来的表面边界层结构. 如果依照阿尔文[55], 称呼这些被边界层包裹起来的等离子天体系统为“细胞(cells)”, 那么这些既能隔离周围环境又可与环境交换能量的边界层就是“细胞壁(cell walls)”, 而主要负责储存和传输能量的等离子电流系统就是这些细胞内流动的“血脉(blood circulation)”, 等离子体及其湍动波就是这些细胞的“肌肉(muscles)”, 能够将引力能转换为电磁能的局部引力中心则是这些细胞的“心脏(heart)”. 不过, 对于那些遥远宇宙空间中的等离子天体系统, 它们的磁等离子体“细胞”结构在传统天文观测中几乎都是不可见的, 只有通过实地测量, 才能探知它们的结构状态和动力学行为. 而目前, 人类唯一能够进行卫星实地探测的“细胞”样品, 就是日球层及其内部各行星的磁层系统. 因此, 它们对认知其他遥远宇宙等离子天体系统复杂结构和动力学行为的“示范”意义是显而易见的.

例如, 如果没有空间卫星的实地探测研究, 我们有关地球电离层、辐射带、磁层、磁层顶、无碰撞激波、太阳风湍动、等离子体电缆、日球边界层以及全球电流系统等空间磁等离子体结构状态和动力学耦合关系的物理认知, 可能依然在“黑暗”中摸索、争论和徘徊, 甚至被严重误导. 有关太阳耀斑磁重联驱动机制和太阳射电暴相干辐射机制的研究, 就是两个典型例子. 在太阳耀斑磁重联驱动机制的研究中, 一个经常出现的误区是认为耀斑发生的地方就是磁重联区. 但是, 与地球极光现象有关的卫星空间探测研究显示, 驱动极光的磁重联区实际上是在地球磁尾的中性电流片里, 而极光高能电子的加速则发生在极区磁层内, 极光发生的电离层底部只是最终的能量耗散区. 在整个极光电路能量传输链的大部分关键区域中, 由于不产生强烈的电磁波辐射而在传统的“天文观测”中都是几乎完全不可见的“暗区”, 阿尔文称之为“不可见的能量传输”[55]. 至于太阳射电暴的辐射机制问题, 也是由于缺乏对辐射源区磁等离子体结构状态的实地探测知识, 长期以来一直在等离子体辐射和电子回旋脉泽辐射两种机制间争议不断. 相比地球极光千米波辐射的情形, 正是由于对其辐射源区积累了大量卫星实地探测资料, 故而其电子回旋脉泽辐射机制已经得到了不受争议的普遍认可.

因此, 对于现代等离子天体物理学的研究, 由于宇宙等离子天体系统“细胞状”结构和电动力学过程的复杂性、特别是由于其电流系统和能量传输过程的“不可见”性, 仅通过等离子天体电磁辐射的天文观测这一传统研究手段是远远不够的. 必须充分利用地球磁层和日球层空间等离子体卫星实地探测这个天然的“等离子天体物理实验室”的“实验研究”结果, 并将它们适当外推应用到宇宙其他等离子天体环境中. 这样的外推, 需要我们基于等离子体集体相互作用的基本物理特性, 重新构建宇宙等离子天体的结构和状态, 确立全新的等离子体

宇宙观, 这必将给现代天文学研究的发展带来巨大而深远的影响. 正如阿尔文教授在专著《宇宙等离子体》中文版的序言中指出[55]: **"3、4个世纪以前, 伽利略发明了望远镜, 使我们改变了对宇宙环境的认识. 同样, 科罗廖夫发射的苏联第一颗人造卫星以及范·艾伦发展的尖端测量技术给空间物理研究带来了类似的巨大变化. 结果是, 实验室测量和磁层测量向天体物理的外推, 正在使天体物理学发生着只有哥白尼-伽利略革命才可比拟的深刻变化."**

6 总结与展望: 第3次天文学革命与等离子体宇宙观

自从人类进入空间时代以来, 摆脱了地球大气障碍的现代全波段天文观测已经给我们展现了一幅完全不同于自伽利略将望远镜指向天空以来传统的光学天文学观测所认知的宇宙图景. 在这幅新的宇宙图景中, 构成宇宙可观测物质主体的, 不是散落在宇宙苍穹里的恒星和星系, 而是弥漫在浩瀚宇宙间的星际、星系际、星系团际热介质以及高能粒子束流, 它们普遍处于稀薄的高温等离子体状态, 是现代射电天文学和X射线天文学的主要观测研究对象, 但在传统光学天文学的观测视野中是"不可见"的可观测物质. 这也带来了天体物理学的重大变化, 各类天体的高能爆发活动现象成为当代天体物理学研究的主流方向, 并衍生出以等离子天体及其活动现象为主要研究对象的新兴分支学科—**等离子天体物理学**.

自上世纪60年代等离子天体物理学诞生以来, 在射电和X射线天文学领域里已经取得了令人瞩目的巨大成功. 例如, 大力促进了高温热电子和非热高能电子的X射线辐射转移理论的发展, 并在各类热和非热X射线源的物理诊断中取得了广泛的应用, 极大地拓展了人们对宇宙天体结构和状态的认知[22]. 在射电天文学方面, 等离子体中高能电子束自发和感应辐射机制理论模型的研究, 也为从地球极光千米波、太阳射电暴到射电脉冲星、射电星系等各类宇宙射电源的天体物理学研究提供了有力的诊断工具[16, 94]. 同时, 针对这些宇宙高温等离子体加热和非热高能电子束加速的微观物理机制, 也开展了大量的观测分析和理论研究工作, 一直是等离子天体物理学主要的重点研究领域[47]. 不过, 等离子天体电磁辐射的观测, 主要反映的是其能量释放过程的有关物理信息, 与辐射机制有着直接联系, 但与它们的加热和加速过程以及加热和加速能量的传输和储存过程没有什么直接的联系, 正如阿尔文指出的[55]: 这些都与电磁辐射观测中"不可见的能量传输"过程有着密切联系. 其实, 在等离子天体系统中, 重要物理过程的"不可见"性也是宇宙物质处于等离子体状态下复杂的"集体"动力学本质所决定的, 对于它们的研究需要借助于传统天文学天体电磁辐射观测之外的新型天文研究手段—基于空间等离子体实地卫星探测的"实验外推"方法.

基于所谓标准大爆炸宇宙模型, 从早期热宇宙的夸克-胶子等离子体、重子-轻子等离子体以及质子-电子等离子体到复合之后的再电离等离子体, 宇宙物质的基本物态一直都是等离子体. 所以, 等离子天体物理学不仅是全面、完整地解析再电离宇宙等离子天体结构状态及其爆发活动机制的理论基础, 也是了解早期热宇宙及其膨胀演化史的必备钥匙. 不过, 等离子天体由于微观粒子间电磁耦合的集体相互作用特性, 尽管其中每个粒子都遵循熟知的经典运动方程, 但众多粒子经电磁相互作用耦合起来后却呈现出极端复杂、难以预测的集体行为, 究其原因应该是多粒子系统电磁耦合的复杂强非线性特性所致. 正如空间等离子体卫星实地探测发现了大量传统天文观测手段无法发现的宇宙结构和行为这一事实所显示的, 对于等离子天体动力学行为的理解, 基于现有理论的推理和预测经常显得无能为力, 更多的需要依靠实验测量所积累的经验知识. 因此, 仅靠天文观测研究的手段, 难以解决等离子天体物理学研究所遇到的大多数问题, 必须借助在空间卫星实地测量基础上建立起来的实验知识和经验模型, 外推到其他宇宙等离子天体系统, 进而更加准确地理解等离子天体集体相互作用特性在各类天体结构状态及其爆发活动中所起的作用.

正如上节所描述的, 随着在金斯引力不稳定性驱动下的发展, 宇宙再电离等离子天体物质的基本分布特征是形成一系列不同尺度上的以局部引力

中心为"心脏"、等离子电流系统为"血脉"、相互作用边界层为"细胞壁"的有机"细胞"结构. 在中心引力场和电磁力的共同作用下, 周围磁等离子体通过集体相互作用的自组织过程, 形成一系列的局部电流系统, 这些局部电流系统的一个重要功能就是在其"主动等离子体区(发电机区)"将引力能(或源自引力能的其他形式能量)转换成电磁能储存在电流系统中, 并通过电流系统输运到"被动等离子体区(耗散释放区)"[55]. 当电流系统中储存的电流或能量达到一定的不稳定阈值时, 将触发不稳定性并导致储存电磁能的大规模突然释放, 这些释放的能量最初主要以激发周围等离子天体中强湍动等离子体波的形式为主, 随后通过波粒相互作用转换成等离子体粒子的能量, 以非热高能粒子束流或局部高温炽热等离子体的形式存在, 并伴随产生辐射电磁波的强烈爆发.

在这些宇宙等离子天体有机"细胞"结构的形成过程中, 有两个关键的核心因素: 一是引力与电磁力的竞争与合作; 二是等离子体集体相互作用的本质特性, 这两个因素的相互耦合导致一系列复杂的能量传输和转化过程. 不过, 在从最初的引力能到最终的电磁辐射波能的一系列能量传输与转化过程中, 只有最终辐射电磁能的信息可以通过各种天文望远镜观测到, 而其中的一系列磁等离子体结构和集体动力学过程是天文观测手段探测不到的. 因此, 除了传统的天文观测手段之外, 我们必须借助其他研究方式来获取有关等离子天体的磁等离子体结构和电流系统的物理信息. 而行星磁层和日球层等离子体及其电流系统, 无疑是一个、也是唯一一个可以进行卫星实地探测的宇宙等离子天体系统. 因而, 也是等离子天体物理学研究重要的**天然实验室**. 只是迄今为止, 大多数天文学家似乎还没有充分意识到这个天然实验室对于现代天文学和天体物理学研究的重要性.

阿尔文甚至认为, 空间等离子体测量结果向其他宇宙等离子天体的外推, 将带来天文学的第3次革命[95]. 天文学的第1次革命是基于400多年前伽利略望远镜观测和牛顿引力理论相结合带来的从地心说到日心说的革命性转变, 并进而确立了以牛顿万有引力理论为基础的**稳恒均匀静态宇宙观**. 第2次革命是基于上世纪初有关天体红移现象的哈勃膨胀观测与相对论、量子论的结合带来的从静态稳恒宇宙观到动态演化宇宙观的重大转变, 其核心是确立了关于宇宙奇点大爆炸后从基本粒子到结构形成的物质创生过程和宇宙膨胀演化过程的**大爆炸膨胀宇宙观**.

而这一次革命, 则是基于空间卫星实地探测和等离子天体物理学的结合, 进而确立新型的**等离子天体宇宙观**, 其中构成宇宙物质结构的基本单元是由于金斯引力不稳定性和电磁力共同作用下形成的具有各种不同尺度的等离子天体"细胞", 而行星、恒星和星系、星系团等局部引力中心则是相应尺度上等离子天体"细胞"的"心脏", "细胞壁"就是相应等离子天体与周围宇宙星际环境相互作用的边界层, 链接"心脏"和"细胞壁"的等离子天体电流系统就是"细胞"内流动的"血脉", 那些充满局部行星际、星际和星系际、星系团际宇宙空间的等离子体及其湍动波就是相应"细胞"的"肌肉". 因此, 在这个新型的等离子体宇宙观中, 宇宙的结构不再是一颗颗彼此分立、能够几乎稳恒地发光的孤立星体, 而是具有各种不同尺度、有血有肉、相互关联的、活动的有机"细胞". 而且, 小尺度的"细胞"可以通过"血脉"的链接组成更大尺度的"细胞", 而整个可观测宇宙很可能就是一个膨胀中的大"细胞".

伴随人类空间时代的到来, 由地球磁层和日球层空间等离子体实地探测研究引起的第3次天文学革命, 也给天体物理学、特别是等离子天体物理学提出了一系列挑战性的重大科学问题. 这里, 我们简要列举其中几个急待开展、需要进行深入研究的科学问题.

(1)宇宙磁场的起源与磁单极子的存在性问题: 现代天文观测发现宇宙空间普遍存在从行星、恒星到星系、星系团等各种尺度的磁场. 而且, 基于近来已经穿越日球层、进入星际介质的Voyagers卫星实地探测资料的分析研究也显示, 在宇宙弥散介质中可能普遍存在一个从宇宙天体大尺度一直延伸到粒子微观动力学尺度的等离子体密度和磁场的连续湍动谱[96–97]. 无论是各种宇宙等离子天体尺度上的整体磁场、还是连续介质中的湍动磁场,

在宇宙等离子天体结构的形成和演化中都必然扮演重要角色. 因此, 它们的起源问题也势必会影响到宇宙演化的各个时期, 甚至会改写现有宇宙演化的历史. 例如, 既然早期热宇宙的辐射场随着宇宙演化, 已经逐渐与物质粒子脱耦并作为宇宙微波背景辐射残存至今. 那么, 早期等离子体热宇宙的湍动磁场是否也会随着宇宙演化过程中的相变而残留下来以及在后来的宇宙演化进程中起什么作用, 都是需要进一步厘清的问题. 如果进一步追溯至宇宙粒子创生时期的极早期演化过程, 在极早期宇宙演化的进程中是否伴随有磁单极子的产生和湮灭, 也将对现存的宇宙物质成份及其天体物理特性具有极其重要的影响[98].

(2)宇宙等离子天体的电荷分布与宇宙净余电荷问题: 在一个完全平衡和均匀的等离子体环境中, 由于静电屏蔽效应, 只在德拜半径的小尺度范围内可能出现净余的空间电荷分布和产生相应尺度上的扰动静电场. 不过, 在一个具有引力中心的等离子天体系统中, 存在大尺度电荷分布和静电场是完全可能的. 例如, 一个处于理想静态平衡状态下的恒星实际上是“带电”的天体(如太阳净余电荷约为77 C)[99–103], 因而恒星之间除了引力相互作用外, 也存在电磁相互作用, 只是与引力相比小到可以忽略不计的尺度. 但是, 对于恒星大气中的单个带电粒子而言, 它们受到“带电”恒星的静电力则是与引力相当(如质子)甚至远大于引力(如电子). 而且, 如果考虑到恒星大气事实上的非均匀和非平衡状态, 实际上的电荷与电场分布要远远高于上述理想状态下的静态平衡值. 作为宇宙“细胞”的等离子天体系统中电荷和电场分布必定对引力中心周围等离子体介质的动力学过程产生重要影响, 只是长期以来以中心星体为主导、忽视星际介质作用的错误观念让人们严重忽视了这类影响. 另一方面, 对于现存的宇宙可观测物质, 一个普遍接受的结果是正反物质间的极端不对称性, 它们起源于极早期宇宙演化过程中正反粒子间约10^{-9}的微弱不对称性. 既然极早期宇宙正反物质粒子间可以存在10^{-9}量级的微弱不对称性, 分别带有正负电荷的重子和轻子之间是否也可能存在类似的“不对称性”, 以致现在的可观测宇宙在整体上可能存在适量的剩余电荷? 事实上, 只要极早期宇宙中重子和轻子间达到10^{-36}量级的极微弱不对称性, 就可能对现在的可观测宇宙结构产生重大影响, 因为现在的电磁力比引力要强10^{36}倍.

(3)宇宙等离子天体电流系统的形成和演化机制问题: 空间时代的到来给天文学研究提供了一个全新的研究手段: 空间等离子体的卫星实地探测研究. 不仅发现了大量传统天文观测手段看不见的等离子天体结构及其电流系统, 也彻底更新了人类对宇宙天体及其活动现象的认知, 并逐步确立新型的等离子体宇宙观. 其中, 构成宇宙物质基本组织单元的是由各种磁等离子体界面分隔着的等离子天体“细胞”, 而在这些等离子天体细胞的结构和演化中起重要关键性作用的, 是把天体引力中心与其周围星际介质紧密联结在一起的等离子天体电流系统, 它们不仅担负着天体系统引力能与电磁能传输与转化这一桥梁和纽带的重要功能, 也是决定等离子天体系统结构与演化以及爆发活动现象最主要的关键因素. 因此, 宇宙等离子天体电流系统的形成机制及其电动力学演化是等离子天体物理学的基础性理论课题, 也是迄今为止尚未得到应有关注、被严重忽视的问题.

(4)宇宙线起源与传输的电动力学问题: 宇宙线, 特别是其中的电子、原子核等带电粒子成份载有大量的电荷和电流, 在穿越广袤星际空间的传播过程中, 必然会引起星际等离子体介质的一系列电动力学响应. 实际上, 阿尔文早在1939年就已经指出, 在不考虑星际介质响应的情况下, 由于自生电流磁场的限制, 宇宙线传播能够携带的最大电流不会超过$17\gamma\beta$ kA的阿尔文极限[104], 其中β和γ分别是宇宙线粒子以光速归一化的速度和相应的相对论因子. 但是, 如果考虑背景星际等离子体介质的电动力学响应, 就可以顺利突破这一阿尔文极限[105]. 星际介质对载流宇宙线传播的响应主要有两个方面, 一是星际磁场可以引导宇宙线粒子沿磁场方向传输形成场向电流, 而场向电流的载流极限可以远远大于上述的阿尔文极限. 另一个突破阿尔文传输电流极限的电动力学响应是背景等离子体介质中感应产生一个反向电流以抵消宇宙线本身的电流, 从而大大减弱载流宇宙线的自生磁

场[106–108]. 在宇宙线研究领域里, 大家关注的主要问题仍然是宇宙线及其能谱的产生和传播机制, 有关其星际空间载流传输电路及其电动力学演化问题甚少涉及. 基于基本的等离子体电荷与电流中性的考虑, 载流宇宙线的星际空间传输也不可能是个孤立的高能粒子传播过程, 必然是作为某种大尺度宇宙等离子体电流回路的一部分而存在, 甚至只是作为这个宇宙电流电路的一个"激发态"而出现. 它们在各类宇宙等离子体电流系统中的电动力学作用也是值得深入研究的课题.

(5)宇宙高温等离子体加热和非热高能粒子加速问题: 基于现代天文学观测, 宇宙可观测物质的90%是弥散在行星际、恒星际、星系际以及星系团际等广袤宇宙空间中的高温等离子体介质. 在宇宙辐射成份与物质粒子成份解耦后的演化过程中, 辐射成份已经随着宇宙的膨胀冷却降温至目前仅约2.7 K的宇宙微波背景辐射温度, 而物质粒子成份却呈现为X射线热辐射源的高温等离子体状态, 相应的加热机制也一直是一个待解之谜[47]. 另外, 有关天体爆发活动现象的观测显示, 非热高能粒子是爆发活动最普遍的产物, 而且普遍呈现幂律形式的能量分布, 有关它们加速机制的研究尽管已经引起了广泛关注, 但依然缺乏成熟和令人满意的理论模型.

(6)宇宙等离子天体系统耗散与结构内在机制的起源问题: 自从热力学建立以来, 以不可逆性为本质特征的"时间之矢"问题就一直幽灵般地困扰着现代科学中从生物细胞到宇宙天体等复杂系统动力学演化的基本理论体系. 尽管玻尔兹曼针对碰撞过程提出的"分子混沌"假说暂时掩盖了经典牛顿力学与经典统计力学之间在经典系统确定论上的矛盾, 为复杂系统从"有序"到"随机"转化的不可逆性提供了一个形式上的桥梁与基石. 但是, 当遇到等离子天体系统这样本质上是由长程相互作用联系起来的复杂系统时, "分子混沌"假说这一基石显然不能成立. 因此, 我们必须为等离子天体系统耗散(有序过程随机化)与结构(随机过程有序化)的形成建立新的内在机制. 与等离子天体物理学几乎同时兴起称之为复杂科学的现代系统论、控制论和信息论(或随后出现的耗散结构论、协同论和突变论)或许能提供我们一些有益的启示. 复杂科学的本质特征是系统内部间的非线性相互作用, 在适当的系统参数范围内, 非线性方程的演化可能呈现对初始条件的敏感依赖性, 以致原本的确定论系统表现出不可预测的非确定论特性, 称之为复杂系统的轨道混沌性[109]. 如果与量子力学测不准原理相结合, 这种不确定性将从根本上无法通过提高实验测量精度来予以消除, 因而上升成为现代复杂系统科学的一个基本原理, 为复杂系统随机化耗散的内在机制奠定了新的基石. 另一方面, 对于一个远离平衡态的开放复杂系统, 在一定条件下也可以通过与外界的能量交换而自发形成稳定的有序结构, 即所谓的"自组织耗散结构", 为开放系统非平衡耗散结构的自发形成提供了合理的"有机"生长机制[110–112]. 事实上, 在现代等离子体宇宙观里, 作为宇宙"细胞"的等离子天体系统就是典型的开放复杂系统, 而且经常处于远离平衡的状态. 因此, 借鉴现代复杂科学的系统论观点, 重新审视宇宙等离子天体系统耗散与结构内在机制的起源问题, 或许有助于我们更加完整地认识等离子天体结构及其爆发活动现象.

最后, 我们想借用陆埮先生在一次关于"宇宙物质起源"演讲中的一句话来结束本文: **"暗物质、暗能量与以太、黑体谱的比较耐人寻味!"**. 确实, 与19世纪末物理学的晴朗天空出现了"以太"和"黑体谱"这两朵极不协调的乌云相似, 现代天文学也遇到了两个理论与观测之间难以调和的突出矛盾: "星系质量短缺"和"宇宙加速膨胀". 一种广泛流传的观点认为, 除了可观测物质以外, 宇宙可能还存在有大量只参与引力相互作用而不参与电磁相互作用的所谓"暗物质"与"暗能量". 从19世纪末到20世纪初, 人们对"以太"和"黑体谱"的孜孜以求, 结果虽然没有找寻到"以太"的踪迹, 但却导致了相对论和量子论的建立, 对现代科学的发展做出了巨大贡献. 类似地, 对"暗物质"和"暗能量"的持续探索, 或许也将催生当代天文学革命性新理论的出现, 对等离子天体物理学的发展、尤其是等离子体宇宙观的确立做出重要贡献.

参 考 文 献

[1] Harwit W. Astrophysical Concepts. 4th ed. New York: Springer, 2006
[2] 向德琳. 射电天文观测. 北京: 科学出版社, 1990
[3] 张和祺, 徐永煊. 空间天文学. 北京: 国防工业出版社, 1998
[4] Guth A H. PhRvD, 1981, 23: 347
[5] Ludlam T, McLerran L. PhT, 2003, 56: 48
[6] Hof M, Menn W, Pfeifer C, et al. ApJ, 1996, 467: L33
[7] Moiseev A, Yoshimura K, Ueda I, et al. ApJ, 1997, 474: 479
[8] Turner M S. Relative Astrophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 1997
[9] Boesgaard A M, Steigman G. ARA&A, 1985, 23: 319
[10] Wagoner R V. ApJ, 1973, 179: 343
[11] 方励之, 李淑娴. 宇宙的创生. 北京: 科学出版社, 1987
[12] Penzias A A, Wilson R W. ApJ, 1965, 142: 419
[13] Alfvén H. StoAn, 1942, 14: 2.1
[14] Rohlfs K, Wilson T L. 射电天文工具. 姜碧沩, 译. 北京: 北京师范大学出版社, 2020
[15] A. G. 帕考尔楚克. 射电天体物理学. 王绶琯, 郭成光, 译. 北京: 科学出版社, 1973
[16] A. G. 帕考尔楚克. 射电星系. 钱善谐, 译. 北京: 科学出版社, 1981
[17] 叶式辉. 天体的磁场. 北京: 科学出版社, 1978
[18] Miley G. ARA&A, 1980, 18: 165
[19] Begelman M C, Blandford R D, Rees M J. RvMP, 1984, 56: 255
[20] Bridle A H, Perley R A. ARA&A, 1984, 22: 319
[21] Kreplin R W. AnG, 1961, 17: 151
[22] 王绶琯, 周又元. X射线天体物理学. 北京: 科学出版社, 1999
[23] Giacconi R, Gursky H, Paolini F R, et al. PhRvL, 1962, 9: 439
[24] Bowyer S, Byram E T, Chubb T A, et al. Nature, 1964, 201: 1307
[25] Bowyer S, Byram E T, Chubb T A, et al. Science, 1964, 146: 912
[26] Böhringer H, Werner N. A&ARv, 2010, 18: 127
[27] Rosner R, Golub L, Vaiana G S. ARA&A, 1985, 23: 413
[28] Pallavicini R. A&ARv, 1989, 1: 177
[29] Haisch B, Strong K T, Rodonó M. ARA&A, 1991, 29: 275
[30] Favata F, Micela G. SSRv, 2003, 108: 577
[31] Güdel M. A&ARv, 2004, 12: 71
[32] Schuecker P, Finoguenov A, Miniati F, et al. A&A, 2004, 426: 387
[33] McNamara B R, Nulsen P E J. ARA&A, 2007, 45: 117
[34] Zeldovich Y B, Sunyaev R A. Ap&SS, 1969, 4: 301
[35] Sunyaev R A, Zeldovich Y B. Ap&SS, 1970, 7: 3
[36] Rephaeli Y. ARA&A, 1995, 33: 541
[37] Tanimura H, Aghanim N, Kolodzig A, et al. A&A, 2020, 643: L2
[38] Ostriker J P, Steinhardt P. Science, 2003, 300: 1909
[39] Tanimura H, Hinshaw G, McCarthy I G, et al. MNRAS, 2019, 483: 223
[40] Gursky H, Schwartz D A. ARA&A, 1977, 15: 541
[41] Sarazin C L. RvMP, 1986, 58: 1
[42] 尤峻汉. 天体物理中的辐射机制. 2版. 北京: 科学出版社, 1998
[43] Benz A O, Guedel M. A&A, 1994, 285: 621
[44] Falcke H, Körding F, Markoff S. A&A, 2004, 414: 895
[45] Benevolenskaya E E, Kosovichev A G, Lemen J R, et al. ApJ, 2002, 571: L181
[46] Pevtsov A A, Fisher G H, Acton L W, et al. ApJ, 2003, 598: 1387
[47] Wu D J, Chen L. Kinetic Alfvén Waves in Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas. Singapore: Springer, 2020
[48] Sridhar S, Goldreich P. ApJ, 1994, 432: 612
[49] Goldreich P, Sridhar S. ApJ, 1995, 438: 763
[50] Goldreich P, Sridhar S. ApJ, 1997, 485: 680
[51] Wu D J, Fang C. ApJ, 1999, 511: 958
[52] Wu D J, Fang C. ApJ, 2003, 596: 656
[53] Wu D J, Fang C. ApJ, 2007, 659: L181
[54] Wu D J, Yang L. ApJ, 2007, 659: 1693
[55] H. 阿尔文. 宇宙等离子体. 戴世强, 译. 北京: 科学出版社, 1987
[56] Akasofu S I. SSRv, 1981, 28: 121
[57] Kamide Y, Baumjohann W. Magnetosphere-IONOSPHERE Coupling. New York: Springer, 1993
[58] De Feiter L D. SSRv, 1975, 17: 181
[59] Obayashi T. SoPh, 1975, 40: 217
[60] Nagata T. SSRv, 1975, 17: 205
[61] Heikkila W J. SoPh, 1983, 88: 329
[62] Haerendel G. SSRv, 2006, 124: 317
[63] Alfvén H, Carlqvist P. SoPh, 1967, 1: 220
[64] Melrose D B. ApJ, 1995, 451: 391
[65] Melrose D B. ApJ, 1997, 486: 521
[66] Melrose D B. JGRA, 2017, 122: 7963
[67] Zaitsev V V, Stepanov A V. SoPh, 1992, 139: 343
[68] Zaitsev V V, Stepanov A V, Urpo S, et al. A&A, 1998, 337: 887
[69] Khodachenko M L, Zaitsev V V, Kislyakov A G, et al. SSRv, 2009, 149: 83
[70] Kuijpers J, Frey H U, Fletcher L. SSRv, 2015, 188: 3
[71] Tan B L, Yu Z Q, Huang J, et al. ApJ, 2016, 833: 206
[72] Li D, Li Y, Lu L, et al. ApJ, 2020, 893: L17
[73] Boccaletti A, Di Folco E, Pantin E, et al. A&A, 2020, 637: L5
[74] Hargrave P J, Ryle M. MNRAS, 1974, 166: 305
[75] Giovannini M. IJMPD, 2004, 13: 391
[76] Rees M J. Magnetic Fields in the Early Universe//Wielebinski R, Beck R. Cosmic Magnetic Fields. Berlin: Springer, 2005
[77] 徐家鸾, 金尚宪. 等离子体物理学. 北京: 原子能出版社, 1981
[78] Carrington R C. MNRAS, 1860, 20: 254

[79] Birkeland K. The Norwegian Aurora Polaris Expedition, 1902-1903. Vol. 1: On the Cause of Magnetic Storms and the Origin of Terrestrial Magnetism. Christiania: H. Aschelhoug, 1908
[80] Chapman S, Ferraro V C A. Nature, 1930, 126: 129
[81] Chapman S, Ferraro V C A. TeMAE, 1931, 36: 77
[82] Van Allen J A, Frank L A. Nature, 1959, 183: 430
[83] Reiff P H, Collin H L, Craven J D, et al. JGRA, 1988, 93: 7441
[84] Bryant D A. Two Theories of Auroral Electron Acceleration//Buti B. Solar and Planetary Plasma Physics. Singapore: World Scientific, 1990
[85] Wu D J, Chao J K. PhPl, 2003, 10: 3787
[86] Wu D J, Chao J K. JGRA, 2004, 109: A06211
[87] Bruno R, Carbone V. LRSP, 2013, 10: 2
[88] Perri S, Bykov A, Fahr H, et al. SSRv, 2022, 218: 26
[89] Burlaga L, Sittler E, Mariani F, et al. JGRA, 1981, 86: 6673
[90] Feng H Q, Wu D J, Chao J K. JGRA, 2007, 112: A02102
[91] Wu D J, Feng H Q, Chao J K. A&A, 2008, 480: L9
[92] Burlaga L F, Kurth W S, Gurnett D A, et al. ApJ, 2021, 911: 61
[93] Richardson J D, Burlaga L F, Elliott H, et al. SSRv, 2022, 218: 35
[94] Treumann R A. A&ARv, 2006, 13: 229
[95] Alfvén H. NYASA, 1989, 571: 649
[96] Lee K H, Lee L C. NatAs, 2019, 3: 154
[97] Lee K H, Lee L C. ApJ, 2020, 904: 66
[98] 彭秋和, 李宗云, 王德焴. 中国科学A辑, 1985, 5: 466
[99] Pannekoek A. BAN, 1922, 1: 107
[100] Eddington A S. The Internal Constitution of the Stars. Cambridge: Cambridge University Press, 1926
[101] Cowling T G, Milne E A. MNRAS, 1929, 90: 140
[102] van de Hulst H C. //Kuiper G P. The Sun. Chicago: University Chicago Press, 1953
[103] Shklovskii I S. Physics of the Solar Corona. New York: Pergamon Press, 1965
[104] Alfvén H. Physical Review Journals Archive, 1939, 55: 425
[105] Melrose D B. SoPh, 1990, 130: 3
[106] van den Oord G H J. A&A, 1990, 234: 496
[107] Wu D J, Chen L, Zhao G Q, et al. A&A, 2014, 566: A138
[108] Chen L, Wu D J, Zhao G Q, et al. JGR, 2017, 122: 35
[109] Manneville P. Instabilities, Chaos and Turbulence: An Introduction to Nonlinear Dynamics and Complex Systems. London: Imperial College Press, 2004
[110] 尼科利斯, 普里戈京. 非平衡系统的自组织. 徐锡申, 译. 北京: 科学出版社, 1986
[111] Klimontovich Y L. Turbulent Motion and the Structure of Chaos: A New Approach to the Statistical Theory of Open Systems. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991
[112] Horton W, Ichikawa Y H. Chaos and Structures in Nonlinear Plasmas. River Edge: World Scientific, 1996

Plasma Astrophysics and Modern Plasma Cosmology

WU De-jin CHEN Ling
(Key Laboratory of Planetary Sciences, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

ABSTRACT As well known, more than 99% of the observable matter in the universe is plasma and the plasma astrophysics studies various physical processes and phenomena occurring in cosmic plasmas, from small-scale collective interaction processes and energy transforming mechanisms in particle kinetics to the state of large-scale structure of cosmic objects and their eruptive phenomena. The present paper reviews the important role of the plasma astrophysics in the development of the modern astronomy as well as the formation of the modern plasma cosmology based on the history of the cosmic evolution, the formation of large-scale structures, and eruptive phenomena of cosmic objects. In addition, the unique function of satellite in situ exploring researches in space plasmas to act as the natural laboratory for the plasma astrophysics is further elaborated.

Key words Big Bang cosmology, large scale structures of the universe, high energy astrophysics: eruptive activities of objects, plasma astrophysics, cosmology: plasma cosmology